

Vidareutveckling av metod för bedömning av miljöpåverkan i samhällsekonomiska analyser vid investeringar i det svenska elstamnätet

Further development of a method for assessing the environmental impact in cost-benefit analysis of investments in the Swedish national grid

Elinda Andersson

Vidareutveckling av metod för bedömning av miljöpåverkan i samhällsekonomiska analyser vid investeringar i det svenska elstamnätet

Further development of a method for assessing the environmental impact in cost-benefit analysis of investments in the Swedish national grid

Elinda Andersson

Handledare: Kristin Brunge och Sandra Göransson, Svenska kraftnät
Ämnesgranskare: Torun Hammar, institutionen för energi och teknik, SLU
Examinator: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 30 hp

Nivå, fördjupning och ämne: Avancerad nivå, A2E, teknik

Kurstitel: Examensarbete i energisystem

Kurskod: EX0724

Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2016

Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)

Delnummer i serien: 2016:01

ISSN: 1654-9392

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: miljöpåverkansbedömning, livscykelanalys, stamnät, elnät, ekonomisk värdering, Svenska kraftnät

Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

Svenska kraftnät, which is the authority responsible for the Swedish national grid, performs cost-benefit analysis (CBA) to assess which of different investment projects that are of greatest benefit to society. The environmental impacts are also estimated during this analysis. In this paper, a tool for estimating the environmental impacts during the lifetime of a grid component has been developed with the purpose of enabling a more complete environmental evaluation. A life cycle assessment was performed to develop the tool. The impact categories that have been studied are climate change (kg CO₂-eq), freshwater eutrophication (kg P-eq), particulate matter formation (kg PM₁₀-eq) and terrestrial acidification (kg SO₂-eq). To be able to compare the environmental effects with other costs and benefits in the CBA a monetary valuation of the impact categories has been established. The result of this paper indicates that the AC-overhead line is the technology that contributes with the lowest environmental impact during the life cycle. This result, however, is obtained when analyzing different technical alternatives with the same preconditions, which rarely is the case in real projects. The result can therefore differ between different investment projects. The tool enables an assessment of the environmental impacts of different investment projects in the Swedish national grid, and is therefore an important part of the cost-benefit analysis to determine which alternative is best suited.

Sammanfattning

Under de kommande åren ser Svenska kraftnät ett omfattande investeringsbehov i det svenska elstamnätet, bland annat till följd av en ökad utbyggnad av förnybar energi, höga krav på driftsäkerhet och en ökad integrering med den europeiska elmarknaden. Ytterligare en anledning till det ökade investeringsbehovet är att delar av det svenska stamnätet börjar närma sig slutet av sin tekniska livslängd och är därför i behov av reinvestering. Vid investeringar i stamnätet genomför Svenska kraftnät samhällsekonomiska analyser för att undersöka investeringens samhällsnytta, där bland annat miljöpåverkan bedöms.

I detta arbete har ett befintligt miljövärderingsverktyg vidareutvecklats för att möjliggöra en mer heltäckande analys av miljöpåverkan och miljökostnader från investeringar i det svenska elstamnätet. Miljövärderingsverktyget är både applicerbart på investeringar i nya anläggningar samt reinvesteringar i befintliga anläggningar och innefattar stamnätskomponenterna som presenteras i Tabell 1.

Tabell 1. Sammanställning av de implementerade stamnätskomponenterna i miljövärderingsverktyget.

Stamnätskomponent	Specifikation
AC-luftledning	220 kV & 400 kV
HVDC-luftledning	
AC-markkabel	
HVDC-markkabel	
HVDC-sjökabel	Cu- och Al-ledare
AC-station (AIS & GIS)	220 kV & 400 kV
Omriktarstation	
Transformator	250 MVA, 500 MVA, 750 MVA
Reaktor	150 MVAr
Kondensator	165 MVAr

Miljöbedömningen har genomförts genom en livscykelanalys och alla delar av stamnätskomponenternas livscyklar har inkluderats i analysen. De miljöpåverkanskategorier som har studerats är klimatpåverkan (kg CO₂-ekv), partikelformering (kg PM₁₀-ekv), övergödning (kg P-ekv) och försurning (kg SO₂-ekv). En monetär värdering av dessa miljöpåverkanskategorier har sedan genomförts. En total miljökostnad i monetära termer har därmed erhållits vilket möjliggör en jämförelse mot de övriga monetära kostnaderna och nyttorna i den samhällsekonomiska analysen.

Miljövärderingsverktyget skall främst användas i syfte att välja mellan olika alternativ i stamnätsprojekt. Resultatet av analysen visar på att AC-luftledning generellt sett är det alternativ som ger lägst miljöpåverkan och miljökostnad under livscykeln. Detta resultat har dock erhållits vid en jämförelse mellan alternativ med identiska förhållanden, vilket sällan är fallet för verkliga projekt. Olika utbyggnadsprojekt har ofta olika grundsyften, till exempel anslutning av ny elproduktion, driftsäkerhet eller marknadsintegration och systemaspekter avgör vilka tekniker som är lämpliga. Miljövärderingsverktyget möjliggör en bedömning av miljöpåverkan vid olika typer av investeringar i stamnätet och är därför en viktig del i den samhällsekonomiska analysen för att avgöra vilket som är det bäst lämpade alternativet.

Executive summary

In this paper, a tool for estimating the environmental impacts during the lifetime of a grid component has been developed with the purpose of enabling a more complete environmental evaluation. The results indicate that the AC-overhead line is the technology that contributes with the lowest environmental impact during its life cycle. This result, however, is obtained when analyzing different technical alternatives with the same preconditions, which is rarely the case in real projects. The result may therefore differ between different investment projects.

The tool enables an assessment of the environmental impacts of different investment projects in the Swedish national grid. It is therefore an important part in the cost-benefit analysis (CBA) that Svenska kraftnät performs to determine which investment project or alternative is best suited. Furthermore it must be stated that there is a need for recurring updates of the tool, mainly in regards to input for economic valuation, fuel consumption and transport of grid components.

Förord

Detta examensarbete på 30 högskolepoäng har utgjort den avslutande delen av Civilingenjörsprogrammet i energisystem vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Examensarbetet har utförts på uppdrag av Svenska kraftnät och genomförts på kontoret i Sundbyberg.

Jag vill rikta ett stort tack till mina handledare Kristin Brunge och Sandra Göransson på Svenska kraftnät som har gett värdefulla synpunkter, vägledning och råd under arbetets gång.

Jag vill även tacka min ämnesgranskare Torun Hammar på Sveriges Lantbruksuniversitet som har bidragit med kunskap och stöd vid utformningen av livscykelanalysen samt gett viktiga synpunkter på rapporten.

Slutligen vill jag tacka alla på Svenska kraftnät som har avsatt tid för att svara på frågor samt bistått med indata till arbetet.

Elinda Andersson
Sundbyberg, maj 2016

Innehållsförteckning

Abstract	ii
Sammanfattning	iii
Executive summary	iv
Förord	v
1 Inledning.....	1
1.1 Syfte.....	1
1.2 Metod.....	2
1.2.1 Avgränsningar	3
2 Bakgrund	5
2.1 Investeringar i stamnätet.....	5
2.1.1 Behovet av miljövärdering vid investeringar i stamnätet.....	6
2.2 Livscykelanalys	7
2.2.1 Systembeskrivning	8
2.2.2 Inventeringsanalys (LCI).....	8
2.2.3 Miljöpåverkansbedömning (LCIA).....	9
2.2.4 Tolkning av resultat.....	9
2.2.5 Ekonomisk värdering av miljöpåverkan	9
2.3 Grundläggande om stamnätet	10
2.4 Teknisk beskrivning av stamnätskomponenter.....	11
2.4.1 Luftledning	11
2.4.2 Mark- och sjökabel.....	15
2.4.3 Stamnätsstation.....	18
2.5 Bygg-, drift- och rivningsfas av stamnätskomponenter.....	20
2.5.1 Luftledning	20
2.5.2 Markkabel.....	21
2.5.3 Sjøkabel.....	21
2.5.4 Station.....	21
3 Utformning av miljövärderingsverktyg.....	22
3.1 Systembeskrivning.....	22
3.1.1 Val av systemgränser	22
3.1.2 Val av miljöpåverkanskategorier	28
3.1.3 Val av resultattolkning	29

3.1.4	Val av ekonomisk värdering	29
3.2	Indata från inventeringsanalys (LCI-data).....	31
3.2.1	Luftledning	31
3.2.2	Kabel	32
3.2.3	Station.....	34
3.2.4	Skogsdata	35
3.2.5	Bränsleförbrukning.....	35
3.3	Indata från miljöpåverkansbedömning (LCIA-data)	37
4	Tillämpning av miljövärderingsverktyg	39
4.1	Tillämpning 1: Val av teknik vid 50 km ledningssträcka.....	39
4.2	Tillämpning 2: Val av stationsteknik.....	40
4.3	Tillämpning 3: Val av teknik vid utbyggnadsprojekt	40
4.4	Känslighetsanalys	41
4.4.1	Känslighetsanalys – Materialtransport	41
4.4.2	Känslighetsanalys – Ekonomisk värdering	41
4.4.3	Känslighetsanalys – Markanvändning	42
5	Resultat.....	43
5.1	Tillämpning 1: Val av teknik vid 50 km ledningssträcka.....	43
5.2	Tillämpning 2: Val av stationsteknik.....	44
5.3	Tillämpning 3: Val av teknik vid utbyggnadsprojekt	46
5.4	Känslighetsanalys – Materialtransport	48
5.5	Känslighetsanalys – Ekonomisk värdering.....	48
5.6	Känslighetsanalys – Markanvändning.....	49
6	Diskussion	50
7	Slutsats	53
8	Kontinuerlig uppdatering av verktyg och vidare studier.....	54
8.1	Förslag till kontinuerlig uppdatering	54
8.2	Vidare studier	55
	Referenslista	56
	Appendix A: Materialdata för stamnätskomponenterna	64
	Appendix B: Linmaterial och linareor för AC-luftledning	69
	Appendix C: Skogsdata	70
	Appendix D: Bränsleförbrukning.....	71

Appendix E: Val av Ecoinventdata	73
Appendix F: Valda tekniker för tillämpning av verktyget	76
Appendix G: Valda tekniker för känslighetsanalys.....	79

Förkortningar

AC – Växelström (*Alternating current*)

DC – Likström (*Direct current*)

HVDC – Högspänd likström (*High voltage direct current*)

AIS – Luftisolerat ställverk (*Air insulated substation*)

GIS – Gasisolerat ställverk (*Gas insulated substation*)

MI – Oljeimpregnerat papper (*Mass impregnated*)

XLPE – Tvärbunden polyeten (*Cross linked polyethylene*)

LCA – Livscykelanalys (*Life cycle assessment*)

LCI – Inventeringsanalys (*Life cycle inventory analysis*)

LCIA – Miljöpåverkansbedömning (*Life cycle impact assessment*)

ALCA – Bokförings livscykelanalys (*Attributional life cycle analysis*)

CLCA – Konsekvens livscykelanalys (*Consequential life cycle analysis*)

CV-metoden – Scenariometoden (*Contingent valuation method*)

WTP – Betalningsvilja (*Willingness to pay*)

WTA – Acceptanskostnad (*Willingness to accept*)

CBA – Kostnadsnyttoanalyser (*Cost benefit analysis*)

1 Inledning

Utbyggnaden av förnybar elproduktion och behovet av ett robust och tillförlitligt elnät ställer höga krav på det svenska elstamnätet. Det finns även ett ökat behov av att skapa en integrerad europeisk elmarknad, samtidigt som många delar av Sveriges stamnät börjar närma sig slutet av sin tekniska livslängd. Svenska kraftnät (Svk), som ansvarar för stamnätet i Sverige, ser därför ett behov av en kraftig investeringsökning i stamnätet under de kommande åren (Svenska kraftnät 2016, s.7). Investeringarna i stamnätet sker i form av underhåll och reinvesteringar i befintliga anläggningar samt byggnation av nya anläggningar. Dessa stamnätsinvesteringar är av stor betydelse både för att uppnå uppsatta energipolitiska mål men även för att upprätthålla en hög driftsäkerhet och tillgodose samhällets elbehov. Stamnätet är en del av Sveriges infrastruktur och det stora elberoendet i samhället medför att störningar i stamnätet kan få stora konsekvenser och påverka många viktiga samhällsfunktioner. Eftersom stamnätet dessutom har en stor påverkan på underliggande nät är stamnätets driftsäkerhet av stor vikt (Svenska kraftnät 2016, s.24).

Svenska kraftnät har fått i uppdrag av den svenska regeringen att förvalta, driva och utveckla ett miljöanpassat kraftöverföringssystem (Notisum 2016). För att uppfylla detta uppdrag undersöker Svenska kraftnät miljökostnaden för olika investeringsprojekt för att minimera stamnätets miljöpåverkan i så stor utsträckning som möjligt. Verktøget som används av Svenska kraftnät för att bedöma miljöpåverkan vid investeringar i stamnätet är dock i behov av uppdatering samt vidareutveckling då det bland annat saknar vissa stamnätskomponenter.

1.1 Syfte

Detta examensarbete har utlysts av Svenska kraftnät med syftet att möjliggöra en mer heltäckande bedömning av miljöpåverkan vid investeringar i det svenska elstamnätet. Målet med arbetet var att vidareutveckla och kvalitetsgranska ett befintligt miljövärderingsverktyg som används i samhällsekonomiska analyser vid investeringar i det svenska elstamnätet.

Det befintliga verktyget utformades i ett tidigare examensarbete av Karin Lövebrant år 2012 genom att miljöpåverkan för investering i stamnätets ledningar, kablar och stationer studerades i en livscykelanalys. Verktøget har därefter används internt inom Svenska kraftnät vid de samhällsekonomiska analyser som genomförs för att undersöka om investeringar och reinvesteringar är samhällsekonomiskt lönsamma att genomföra ur ett miljöperspektiv.

Svenska kraftnät såg dock ett behov av att uppdatera och kvalitetsgranska det befintliga verktyget samt att vidareutveckla det för fler stamnätskomponenter. Det vidareutvecklade verktyget ska därmed möjliggöra en mer heltäckande analys av miljöpåverkan och total miljökostnad. Detta för att möjliggöra att utbyggnaden av det svenska elstamnätet ger så liten miljöpåverkan som möjligt.

Syftet med studien var att erhålla en vidareutvecklad och kvalitetssäkrad metod för bedömning av miljöpåverkan för olika investeringar i det svenska elstamnätet beroende på val av bland annat teknik, spänningsnivå och placering.

Vidare var målsättningarna med arbetet att

- vidareutveckla verktyget till att innehålla de vanligaste förekommande stamnätskomponenterna i det svenska elstamnätet
- kvalitetsgranska tidigare metodik, beräkningar och indata i det befintliga verktyget samt utveckla och uppdatera dessa
- utveckla verktyget till att vara applicerbart även på spänningsnivån 220 kV, utöver dagens 400 kV
- utveckla verktyget till att möjliggöra analys av flera olika ledningssträckor och alternativ i samma körning
- öka verktygets användarvänlighet och valmöjlighet
- införa en metodik för att möjliggöra en kontinuerlig uppdatering av verktyget
- undersöka vilken teknik som ger lägst miljöpåverkan och lägst miljökostnad genom att tillämpa verktyget på olika ledningsprojekt.

1.2 Metod

För att vidareutveckla, uppdatera och kvalitetsgranska miljövärderingsverktyget har en ny livscykelanalys (LCA) genomförts utifrån stamnätets komponenter. Detta medför att den tidigare analysen i sin helhet har gjorts om och ett nytt Excelverktyg har utvecklats, men med det tidigare verktyget som utgångspunkt.

För de flesta tekniker har indata uppdaterats utifrån mer aktuella uppgifter. I de fall då det tidigare examensarbetet har använts som källa för indata har det tydligt angetts i texten och det rör främst materialdata för AC-markkabel och reaktor samt skogsdata och indata för transport av material. En sammanställning över teknikerna som ingick i det ursprungliga verktyget samt de som vidareutvecklats i detta arbete åskådliggörs i Tabell 2.

En litteraturstudie genomfördes för att erhålla information om elnätets komponenter, LCA-metodik, avfallshantering samt miljöekonomi. Materialdata för de olika komponenterna i stamnätet samt indata för bränsleförbrukning erhöles från anställda på Svenska kraftnät, tillverkare av elnätskomponenter, vetenskapliga artiklar samt litteratur inom ämnet. Databasen Ecoinvent version 3.2 (2015) användes för insamling av indata för miljöpåverkansbedömningen.

Därefter konstruerades ett nytt verktyg i Excel där all insamlad data implementerades med en större detaljrikedom, transparens och ökat antal valmöjligheter än det tidigare verktyget. Miljövärderingsverktyget tillämpades sedan på tre olika fall för att undersöka vilken teknik som ger den lägsta miljöpåverkan och lägsta totala miljökostnaden. De projekt som studerades var en tänkt ledningssträcka på 50 km i Norrland, en stationsutbyggnad samt ett verkligt utbyggnadsprojekt under utredning mellan Sverige och Finland. Projekten beskrivs mer ingående i avsnitt 4. En känslighetsanalys genomfördes utifrån transportsträcka för material, ekonomisk värdering samt markanvändning, vilket beskrivs i avsnitt 4.4. Känslighetsanalysen genomfördes för att undersöka hur stor påverkan dessa parametrar har på slutresultatet samt för att ytterligare kvalitetssäkra verktyget.

Tabell 2. Sammanställning av de tekniker som ingick i det ursprungliga verktyget samt vilka tekniker som har kvalitetssäkrats, uppdaterats och implementerats som nya i det vidareutvecklade miljövärderingsverktyget. De tekniker som fanns implementerade i det ursprungliga verktyget anges med X.

Teknik/funktion	Ursprungligt verktyg	Nytt verktyg
AC-luftledning (220 kV)		Infört ny teknik
AC-luftledning (400 kV)	X	Infört ny teknik
HVDC-luftledning	X	Kvalitetssäkrat och uppdaterat data
AC-markkabel	X	Kvalitetssäkrat data
HVDC-markkabel	X	Infört ny teknik
HVDC-sjökabel	X	Infört ny teknik
Station 220 kV – GIS		Infört ny teknik
Station 220 kV – AIS		Infört ny teknik
Station 400 kV – GIS		Infört ny teknik
Station 400 kV – AIS	X	Kvalitetssäkrat och uppdaterat data
Transformator	X (500 MW)	Infört ny teknik (250 MW; 500 MW; 750 MW)
Kondensator		Infört ny teknik
Reaktor	X	Kvalitetssäkrat data
Omriktarstation	X	Kvalitetssäkrat och uppdaterat data
Val av olika stolptyper		Införts som ny funktion
AC-luftledning (220 & 400 kV); Detaljerade val för linor		Införts som ny funktion
Analys av två olika investeringsprojekt i samma körning		Införts som ny funktion
Analys av flera ledningssträckor i samma körning		Införts som ny funktion

1.2.1 Avgränsningar

Analysen har genomförts utifrån ett livscykelperspektiv, det vill säga en analys av komponenternas miljöpåverkan under hela livscykeln, från tillverkning till rivning och avfallshantering. Framställning av jungfruligt material och tillverkning av förädlad produkt har inkluderats i analysen men på grund av begränsad tillgång på indata har konstruktionen av respektive stamnätskomponent inte studerats. För till exempel en stål stolpe har produktionen av stålet beaktats medan konstruktionen av själva stolpen har bortsetts från. Produktion av material utgör vanligtvis den största miljöpåverkan, vilket medför att denna avgränsning anses ha begränsad påverkan på systemets totala miljöpåverkan.

För att undvika dubbelräkning har endast den studerade investeringen tagits med i analysen. Miljöpåverkan från en eventuell rivning av andra ledningar och stationer till följd av den nya investeringen antas belasta det tidigare genomförda projektet, då det antas att alla projekt studeras utifrån ett livscykelperspektiv.

Den miljöpåverkan från elnätsförluster eller förändrad produktionsmix som en stamnätsinvestering kan ge upphov till har inte inkluderats i verktyget då det har legat utanför tidsramen för detta arbete. Vidare avgränsningar och antaganden presenteras löpande i arbetet.

2 Bakgrund

I följande avsnitt ges en översiktlig beskrivning av investeringarna i det svenska elstamnätet, behovet av miljövärdering vid dessa investeringar, teorin bakom livscykelanalys samt en grundläggande beskrivning av det svenska elstamnätet och dess komponenter.

2.1 Investeringar i stamnätet

Svenska kraftnät, Svk, är ett statligt affärsverk som har fått i uppgift av regeringen, enligt förordning (2007:1119) 1§, ”att på ett affärsmässigt sätt förvalta, driva och utveckla ett kostnadseffektivt, driftsäkert och miljöanpassat kraftöverföringssystem, sälja överföringskapacitet samt i övrigt bedriva verksamheter som är anknutna till kraftöverföringssystemet” (Notisum 2016). Svk har systemansvaret för den svenska elförsörjningen på både kort och lång sikt. Detta medför bland annat ansvar för balansregleringen, det vill säga att säkerställa att produktion och konsumtion av el alltid är lika stor så att frekvensen hålls inom $50 \pm 0,1$ Hz (Svk 2015a, s.7).

Svk ska även arbeta för en öppen nordisk elmarknad genom att bland annat bygga bort frekvent förekommande flaskhalsar i stamnätet, det vill säga trånga sektioner där överföringskapaciteten är begränsad. Då många av flaskhalsarna endast uppstår under ett fåtal av årets timmar, till exempel vid hög last, är det inte lönsamt ur ett samhällsekonomiskt perspektiv att bygga bort samtliga överföringsbegränsningar i elnätet. År 2011 infördes ett system med elområden i Sverige där så kallade snitt drogs vid de största flaskhalsarna i stamnätet vilket delade upp Sverige i fyra elområden, vilket illustreras i Figur 1 (Svk 2015b, ss.19-20).

I dessa områden sätts elpriset efter tillgång och efterfrågan på el inom området samt import- och exportmöjligheterna från och till angränsande områden. I norra Sverige, i elområdena SE1 och SE2, är det under normala förhållanden ett överskott på el då den största delen av vattenkraftproduktionen finns där, samtidigt som befolkningsandelen är låg. I södra Sverige, i elområdena SE3 och SE4, är det istället ofta underskott på el då det finns relativt få elproducenter i förhållande till befolkningsmängden och en hög konsumtion av el. För att jämna ut obalansen mellan produktion och konsumtion i landet krävs därför att elen i regel överförs från norr till söder.

Begränsningar i överföringskapaciteten mellan elområdena medför att det inte alltid är möjligt att överföra tillräckligt stora mängder el till underskottsområdena. Vid dessa tillfällen krävs det att dyrare produktion startas upp i underskottsområdena för att täcka konsumtionen och som följd blir elpriset högre än i överskottsområdena. Denna prisskillnad multipliceras med det flöde som överförs mellan områdena och blir en intäkt som delas mellan stamnätsägarna för de två områdena. Om begränsningen sker vid ett internt svenskt snitt tillfaller hela intäkten Svenska kraftnät. Denna intäkt kallas kapacitetsintäkt eller flaskhalsintäkt och skall användas av Svenska kraftnät för att bland annat öka överföringskapaciteten i snitten genom investeringar som minskar begränsningarna i stamnätet (Svk 2015b, ss.19-20).



Figur 1. Illustration över de fyra elområdena i Sverige (Svensk Energi u.å.).

2.1.1 Behovet av miljövärdering vid investeringar i stamnätet

Svenska kraftnät genomför samhällsekonomiska analyser för att bedöma vilka investeringar i nya och befintliga anläggningar i stamnätet som är samhällsekonomiskt lönsamma att genomföra. De effekter som undersöks i denna analys är investeringens påverkan på bland annat överföringsförluster, leveranssäkerhet, miljöpåverkan samt elmarknadsnytta. En investerings miljöpåverkan analyseras utifrån ett livscykelperspektiv och kan värderas med hjälp av monetära värderingsmetoder. Vid denna analys används i dagsläget ett miljövärderingsverktyg som utvecklats av Svenska kraftnät för bedömning av miljöpåverkan vid investeringar i ledningar, kablar och stationer i stamnätet.

De samhällsekonomiska analyser som genomförs av Svenska kraftnät kan vara av större eller mindre omfattning beroende på investeringsbehovet. Vid anslutning av ny produktion eller konsumtion gäller anslutningsskyldighet och den samhällsekonomiska analysen visar då på vilken nätåtgärd som ger lägst samhällsekonomisk kostnad. I denna bedömning inkluderas inte värderingen av produktionsanläggningens samhällsnytta, utan endast de nätåtgärder som krävs för att behålla en hög driftsäkerhet på stamnätet vid anslutning av den nya elproduktionen.

Svenska kraftnät genomför reinvesteringar när risken för tekniska fel i stamnätet blir för stor, innan den tekniska livslängden för anläggningarna uppnått. Detta för att undvika att stora haverier i stamnätet uppstår, något som skulle kunna få allvarliga konsekvenser för viktiga samhällsfunktioner (Svk 2014a, s.12; Svk 2015a, s.24). Vid reinvesteringar i stamnätets ledningar och stationer görs i de flesta fall ingen samhällsekonomisk analys då det oftast är uppenbart att investeringen kan motiveras ur ett samhällsekonomiskt perspektiv. För investeringsprojekt vars drivkraft är ökad marknadsintegration, det vill säga att öka överföringskapaciteten mellan elområdena i Sverige eller utlandet blir den samhällsekonomiska analysen i regel mer omfattande då fler effekter blir aktuella att studera.

På Svenska kraftnät genomförs den samhällsekonomiska analysen utifrån principen om kostnads nyttoanalys (*Cost benefit analysis*, CBA), där alla samhällskostnader för en investering skall vägas mot alla samhällsnyttor som investeringen bidrar till. De effekter som tas upp är både direkta och indirekta effekter. De direkta effekterna är sådana som uppstår som en direkt konsekvens av investeringen, medan de indirekta effekterna är sådana som uppstår i ett senare led, till följd av de direkta effekterna.

I praktiken är det svårt att genomföra en heltäckande samhällsekonomisk analys eftersom en investering ger effekter i många led. Dessutom är många effekter en samverkan av andra investeringar och händelser i samhället och det kan vara problematiskt att isolera vilka effekter som är en följd av just investeringen i stamnätet. I praktiken avgränsas därför den samhällsekonomiska analysen till de effekter av investeringen som kan antas ha betydande påverkan. De effekter som inte har något marknadspris värderas med hjälp av monetära värderingsmetoder, så som betalningsvilja eller ersättningskostnad. Finns det ingen möjlighet att kvantifiera effekterna värderas de kvalitativt.

Vid den slutliga bedömningen kring investeringens lönsamhet sett ur ett samhällsperspektiv ställs den totala nyttan av investeringen mot den totala kostnaden. Även de kvalitativa effekterna tas med i denna bedömning och en investering kan bedömmas vara lönsam, trots att den kvantifierade kalkylen visar på en negativ lönsamhet om de kvalitativa effekterna samtidigt visar övervägande positiv påverkan (Svk 2015b, s. 20).

2.2 Livscykelanalys

Livscykelanalys (*Life Cycle Assessment*, LCA) är en metod för att studera miljöpåverkan för en produkts eller tjänsts hela livscykel, från utvinning av råmaterial till avfallshantering. I den internationella standarden för livscykelanalyser, ISO 14040/44, anges vilka steg som skall innefattas i en LCA. Dessa steg är definiering av mål och omfattning av analysen, inventering av material och processer (*Life Cycle Inventory Analysis*, LCI), utvärdering och bedömning av miljöpåverkan för produktens livscykel (*Life Cycle Impact Assessment*, LCIA) samt tolkning av resultaten (ISO 2006). I följande kapitel beskrivs teorin bakom dessa steg mer ingående. I avsnitt 2.2.5 ges en beskrivning av hur miljöpåverkan kan värderas ekonomiskt.

2.2.1 Systembeskrivning

I det första steget definieras syftet med analysen samt den funktionella enheten som ska vara mätbar samt beskriva det undersökta systemets funktion. I de flesta fall är det inte möjligt att följa alla steg i en livscykelanalys och avgränsningar och systemgränser måste därför upprättas. Dessa avgränsningar anpassas efter syftet med studien och skall specificeras utifrån tidsperiod, geografi och processflöden eftersom tillverkning av olika material och produkter kan se olika ut i olika delar av världen. Vilka processflöden som skall beaktas rör främst hur producerade biprodukter och avfall skall hanteras (Röös, Patel & Spångberg 2015).

Allokering är ett exempel på hur biprodukter och avfall kan hanteras, där utsläpp och resursförbrukning delas upp mellan olika produkter utifrån till exempel massa, så kallad fysisk allokering, eller utifrån ekonomiskt värde för produkterna, ekonomisk allokering. Ett annat alternativ är att göra en så kallad systemexpansion. Då expanderas systemet till att innefatta alla de produkter som påverkas av produktionen, till exempel alla biprodukter som fås i samband med tillverkning av den studerade produkten. Genom cut-off kriteriet specificeras vilka processer och produkter som skall exkluderas från livscykelanalysen (ISO 2006; Röös, Patel & Spångberg 2015). I denna metod läggs den totala miljöpåverkan på den produkt som primärt produceras och ingen miljöbelastning läggs på eventuella biprodukter (Ecoinvent 2016).

Det finns två olika typer av LCA, bokföringsanalys (*Attributional-LCA*, ALCA) och konsekvensanalys (*Consequential-LCA*, CLCA). En bokförings-LCA ser till den påverkan som till exempel produktionen av en produkt får, utan att ta hänsyn till eventuella förändringar av yttre system som detta kan ge upphov till. I denna typ av LCA används medeldata då det inte tas någon hänsyn till hur den analyserade produktionen skulle påverka den totala marknaden.

En konsekvens-LCA ser däremot till vilka konsekvenser som produktionen av en produkt får på till exempel världsmarknaden. I denna analys används därför en systemexpansion för att inkludera alla processer som påverkas av produktionen av produkten. I en CLCA används marginaldata eftersom det anses att den analyserade produktionen kan leda till ett ökat eller minskat behov av till exempel el eller framställning av jungfruligt material på världsmarknaden. Sett utifrån detta arbete skulle det därmed medföra att ökade elnätsförluster skulle täckas med marginalel, till exempel kol eller olja, då det antas att de övriga energikällorna redan utnyttjas i den utsträckning som det är möjligt (Röös, Patel & Spångberg 2015).

2.2.2 Inventeringsanalys (LCI)

I inventeringsanalysen studeras ingående och utgående flöden i systemet och all nödvändig bakgrundsdata samlas in för hela livscykeln. Detta kan till exempel vara ingående material för produktion av en produkt eller transportsträckor. Sedan undersöks resursförbrukning och emissioner som processerna ger upphov till, exempelvis användning av 20 kg aluminium eller utsläpp av 10 kg NO_x. I denna fas genomförs dock ingen bedömning av dessa värden (ISO 2006; Klöpffer & Grahl 2014).

2.2.3 Miljöpåverkansbedömning (LCIA)

För att ha möjlighet att dra någon slutsats kring resultaten från livscykelinventeringen genomförs en miljöpåverkansbedömning. Denna del av livscykelanalysen skall bedöma den miljöpåverkan som det studerade systemet ger upphov till under sin livscykel.

Utifrån informationen från LCI-steget är det svårt att avgöra den sammantagna miljöpåverkan som de individuella utsläppen ger upphov till eftersom många av emissionerna bidrar till olika typer av miljöpåverkan. Till exempel bidrar NO_x-utsläpp både till övergödning och till försurning. För att ha möjlighet att göra en sammantagen bedömning av systemets miljöpåverkan används därför miljöpåverkanskategorier. De utsläpp som bidrar till en viss miljöpåverkanskategori räknas om till en gemensam ekvivalent. Utsläpp av N₂O och SF₆ bidrar till exempel till miljöpåverkanskategorin klimatpåverkan. Dessa utsläpp räknas då om till CO₂-ekvivalenter för att bedömningen och jämförelsen skall bli enklare att genomföra. Det finns två olika typer av miljöpåverkanskategorier, dels de som beskriver det studerade systemets påverkan på miljöproblem (*midpoint*) och de som i nästa steg beskriver miljöproblemens slutliga påverkan på ekosystemtjänster, mänsklig hälsa och ändliga resurser (*endpoint*).

2.2.4 Tolkning av resultat

I det sista steget av livscykelanalysen skall resultaten tolkas och granskas på ett kritiskt och objektivt sätt. Eftersom en analys av den här typen alltid innehåller många olika antaganden, förenklingar och godtyckliga val av till exempel systemgränser kan även en känslighetsanalys genomföras för att ge en bild över hur stor inverkan dessa val har på slutresultatet.

2.2.5 Ekonomisk värdering av miljöpåverkan

För att möjliggöra att resultaten från livscykelanalysen implementeras i ekonomiska termer i Svenska kraftnäts samhällsekonomiska analys har utsläppen från stamnätskomponenternas livscykel värderats monetärt. En sådan värdering sätter ett pris på utsläpp som inte har något direkt marknadspris. Värderingen kan genomföras på olika sätt och delas in i indirekta och direkta värderingsmetoder. De indirekta metoderna utgår från faktiskt marknadsbeteende, till exempel fastighetsvärderingsmetoden som ser till hur värdet på fastigheter ändras med förändrade miljöfaktorer i det aktuella området.

Direkta värderingsmetoder undersöker hur människor värderar olika utsläpp och deras effekter. Detta kan bland annat genomföras genom att undersöka människors betalningsvilja för att undvika ett utsläpp och därmed även effekten som utsläppet medför, en så kallad *willingness to pay* (WTP) undersökning. Värderingen kan även genomföras utifrån acceptanskostnad, *willingness to accept* (WTA), det vill säga för vilken ersättning som människor är villiga att acceptera den effekt som utsläppen medför (Kinell & Söderqvist 2011, ss.24-25). WTP- och WTA-undersökningar kan genomföras via så kallade scenariometoder, där den vanligaste metoden är *the contingent valuation method*, CV-metoden. I denna metod sätts scenarior upp där den tillfrågade får ange hur mycket hen är beredd att betala för att undvika att scenariot skall bli verklighet eller vilken ersättning som krävs för att acceptera scenariot. En annan metod är *the choice experiment method*, CE-metoden, där den tillfrågade ställs inför val mellan scenarier med olika nivåer av påverkan

(Kinell & Söderqvist 2011, ss.28-29). Då scenariometoder används för värdering finns det dock alltid en risk för att de tillfrågade anger ett högre värde än vad de verkligen är beredda att betala samt att kunskapen kring den aktuella miljöeffekten är begränsad. När dessa metoder används är det därför av vikt att frågeställningen är väl formulerad samt att den tillfrågade kan relatera till miljöeffekterna (Noring 2014, ss.5-9).

2.3 Grundläggande om stamnätet

Det svenska elnätet består av tre olika nivåer; stamnät, regionnät och lokalnät. Stamnätet i Sverige sträcker sig från norr till söder, har 17 utlandsförbindelser och är uppbyggt av luftledningar, kablar och stationer (Svk 2016a). Stamnätet har till uppgift att överföra stora mängder el över långa sträckor och brukar ofta liknas vid elens motorvägar. Det är genom stamnätet som sammankopplingen med utlandet sker, vilket möjliggör handel och överföring av el över landsgränserna. I det svenska stamnätet överförs el med spänningsnivåer på 220 och 400 kV. De höga spänningsnivåerna möjliggör att stora mängder elektrisk energi kan överföras över långa sträckor med relativt små förluster.

På regionnätet överförs el med spänningsnivåer på mellan 40-130 kV från stamnätet vidare till olika regioner och städer runt om i landet. Slutligen överför lokalnätet elen på den lägsta nivån i elnätet, med spänningsnivå upp till 30 kV, där distribution av den elektriska energin sker till merparten av de slutliga konsumenterna (Svk 2014a, s.12).

Stamnätet är uppbyggt med växelströmteknik (AC), som med hjälp av transformatorer går att omvandla till olika spänningsnivåer. I växelströmsnät sker överföringen av el i tre faser, medan det för ledningar med likströmsteknik (DC) endast finns två poler (faser) (Svk 2010a, s.22.). Vid överföring av el med DC-teknik krävs omriktarstationer som omvandlar likström till växelström och de stora investeringskostnaderna för dessa medför ofta att likströmsförbindelser inte är ekonomiskt lönsamma för kortare sträckor (Svk 2014a, ss.10, 38). Kablar med högspänd likströmsteknik (HVDC) förekommer vid flera av Svenska kraftnäts utlandsförbindelser, som till exempel *Fenno-Skan 1 & 2* mellan Sverige och Finland samt *NordBalt* mellan Sverige och Litauen (Svk 2014a, s.38). Likströmsöverföringar används även mellan olika synkronområden, det vill säga för att koppla ihop växelströmsnät med olika frekvens (Svk 2014a, s.10).

Stamnätet i Sverige är till största del uppbyggt av luftledningar, men det finns även mark- och sjökablar, vilka främst används vid utlandsförbindelser. Då Svenska kraftnät genomför investeringar i stamnätet är dock luftledningar alltid förstahandsvalet, främst på grund av den ökade driftsäkerheten i och med förenklat underhåll av luftledningar jämfört med kablar (Svk 2015b, s.30). Fördelningen mellan luftledning och kabel samt mellan de olika spänningsnivåerna i det svenska elstamnätet år 2015 redovisas i Tabell 3.

Tabell 3. Luftlednings- och kabelteknikerna i det svenska elstamnätet år 2015 (Svk 2015a, s.33).

	Luftledning (km)	Kabel (km)
Växelström 400 kV	10 980	8
Växelström 220 kV	3 550	29
Höghänsigt likström (HVDC)	100	660

2.4 Teknisk beskrivning av stamnätskomponenter

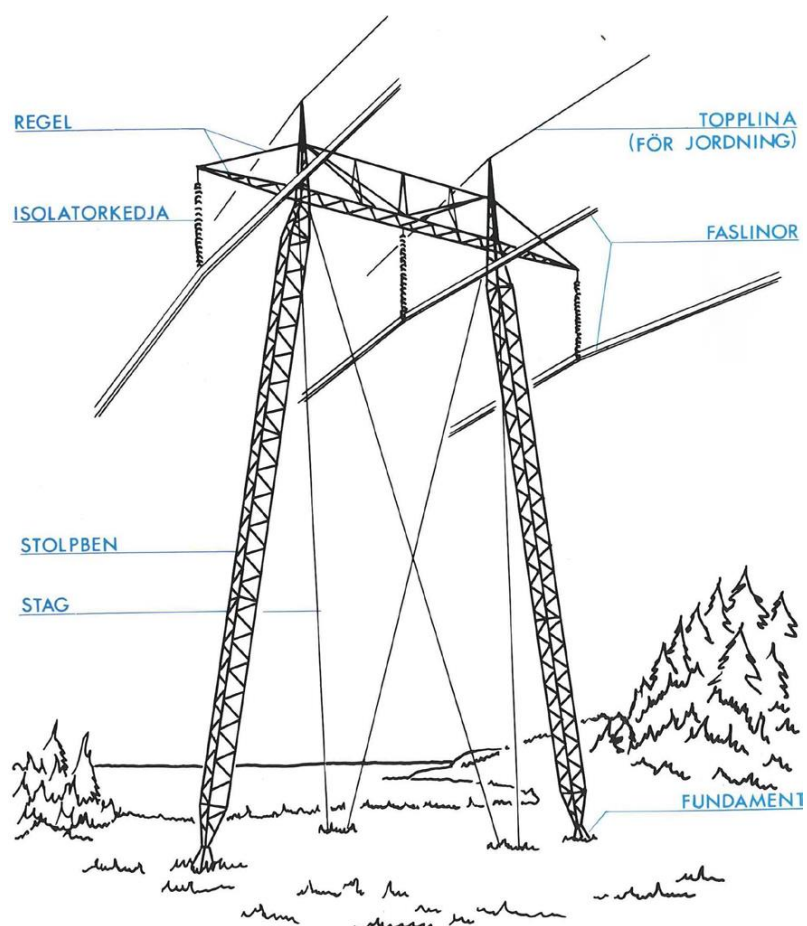
I följande avsnitt ges en teknisk beskrivning för de stamnätskomponenter som implementerats i miljövärderingsverktyget.

2.4.1 Luftledning

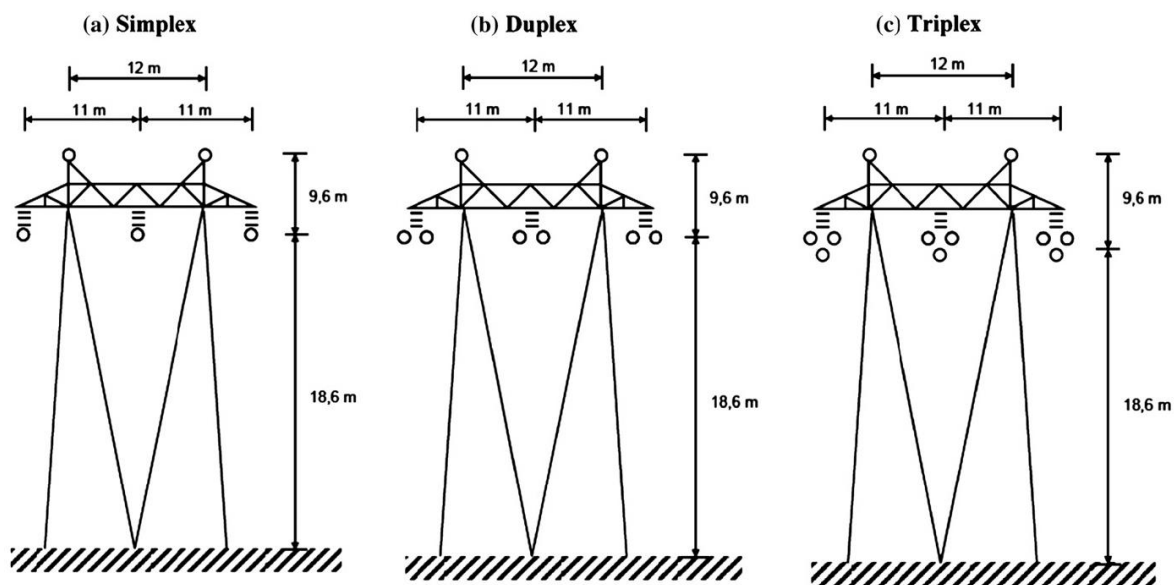
Luftledningar kan konstrueras med AC- eller DC-teknik, men som tidigare nämnt är det främst AC-teknik som används i det svenska stamnätet. En luftledning består av många olika komponenter som bland annat stolpar, faslinor, topplinor och markledare för jordning. Luftledningsstolparna består i sin tur av stolpben, fundament, regler, isolatorkedjor samt i vissa fall stag för ökad stabilitet. En illustration över en luftledningsstolpes olika delar visas i Figur 2.

Luftledningar kan utformas med ett varierat antal linor per fas, där en lina per fas kallas simplex, två linor per fas kallas duplex och tre linor per fas kallas triplex (Svk 2010a, s.22; Svk 2014a, s.26).

För AC-ledningar, som bygger på tre faser, medför det totalt sett tre linor för simplexledare, sex linor för duplexledare och nio linor för triplexledare. Figur 3 visar en jämförelse mellan utformningen av en stolpe med simplex-, duplex- och triplexledare. DC-ledningar, som endast har två poler (faser), har två linor för simplexledare, fyra linor för duplexledare och sex linor för triplexledare (Svk 2014a, s. 26).



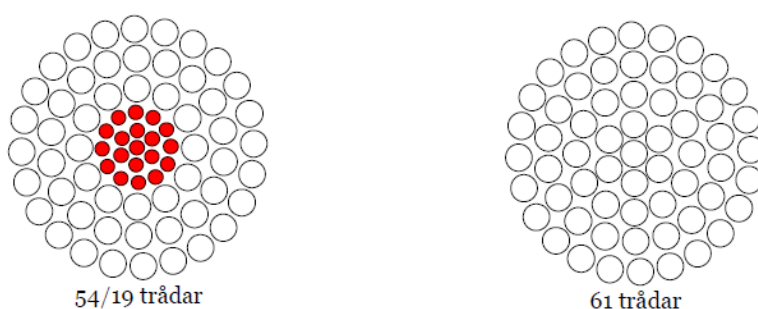
Figur 2. Komponenter hos en luftledningsstolpe av portaltyp för 400 kV (Svk 2014a, s.29).



Figur 3. Jämförelse mellan ledningsstolpe med simplex-, duplex- och triplexutformning (Hertwich & Jorge 2013).

2.4.1.1 Linor och stolpar

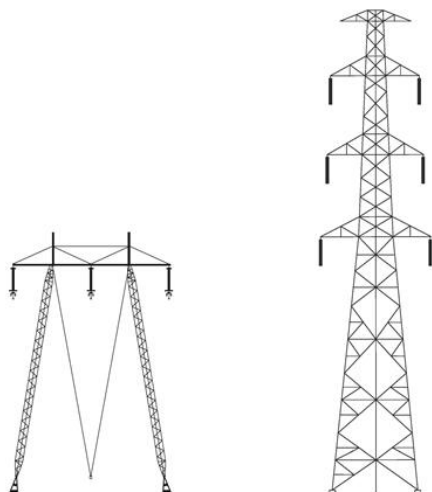
Specifikationer och krav gällande linor och stolpar har utformats av Svenska kraftnät och presenteras i så kallade tekniska riktlinjer, som grundar sig på svenska standarder. Den tekniska riktlinjen för luftledningslinor (TR 05-04 utg. 2) anger de krav som ställs på linor, bland annat specifikationer för olika areor och material. De vanligaste linorna är aluminiumlinor (Al), legerade aluminiumlinor (Al-59/AlMgSi) och stålaluminiumlinor (FeAl). Stålaluminiumlinorna består av en kärna av ståltrådar med ett yttre lager av aluminiumtrådar, medan de aluminium- och legerade aluminiumlinorna endast består av aluminiumtrådar (Svk 2012a). Ett exempel på de olika lintypernas tvärsnitt illustreras i Figur 4. Materialet i linorna kan vara samma oberoende av spänningsnivån, men fler linor per fas används ofta för 400 kV jämfört med 220 kV.



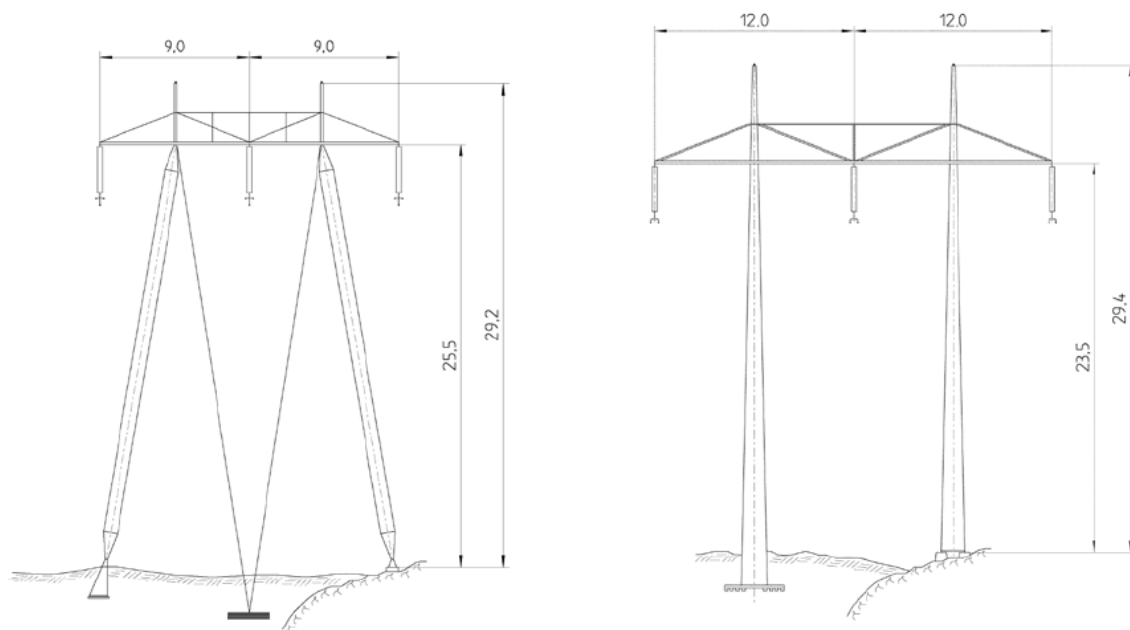
Figur 4. Den vänstra illustrationen visar ett tvärsnitt av en FeAl-topplina med 54 aluminiumtrådar och 19 ståltrådar. Den högra illustrationen visar ett tvärsnitt av en Al-59/AlMgSi-topplina med 61 aluminiumtrådar (Svk 2012a).

Det finns en rad olika stolpar för luftledningar och vilka som väljs för den aktuella ledningen beror bland annat på hur många linor som ledningen består av samt vilken terräng som ledningen går genom. Det krävs även specifika stolpar då en ledning skall byta riktning, så kallade vinkelstolpar (Svk 2013b, s.25). De två standardutförandena för stolpar är portalstolpar, med två stolpben per stolpe, samt julgransstolpe som har ett stolpben per stolpe (Svk 2010a, s.23). Dessa två stolptyper illustreras i Figur 5.

Vissa portalstolpar har stag av stål för att stadga stolpkonstruktionen mot marken. Då ledningsgatan dras genom skogsmark används dessa stadgade stolpar (A-stolpar), medan det för jordbruksmark används ostadgade stolpar (B-stolpar) (Svk 2013c, s.15). Vid en nybyggnation av en 400 kV-ledning byggs ungefär 2/3 av stolparna som A-stolpar (Svk 2016c, s.52). Skillnaderna mellan en A- och B-stolpe visas i Figur 6.



Figur 5. Principskiss av en portalstolpe med stag (typ A) för luftledning (vänstra bilden) och en julgransstolpe för luftledning (högra bilden) (Svk 2016b).



Figur 6. Principskiss över portalstolpar med en stadgad stolpe (typ A) till vänster och ostadgad stolpe (typ B) till höger. Båda dessa stolpar kan konstrueras med fasavstånd på 9 till 12 meter (Svk 2009a, s.9).

Stolpfundament utgörs ofta av betong eller kreosotimpregnerade träslipers och stolparna kan konstrueras av trä, stål eller betong. Vilka typer av fundament som väljs till en stolpe beror på det aktuella underlaget och vid till exempel bergunderlag behövs oftast platsgjutna betongfundament. På stolparna finns även isolatorer av glas eller porslin, som förhindrar att strömmen från linorna förs upp genom fästet och gör stolpkonstruktionen strömförande (Svk 2015a, s.32; Svk 2015c).

I den tekniska riktlinjen för jordning av luftledningar (TR05-13 utg.3) specificeras hur jordning skall genomföras för olika typer av stolpar (Svk 2012b). För jordning av trästolpar kan varje stolpe punktjordas medan det för stålstolpar skall användas en genomgående markledare för jordning. Denna ledare grävs ner utmed hela ledningen och kan bland annat konstrueras av koppar eller kopparbelagd stål (Svk 2012b, ss.11,14). Luftledningarna har även topplinor som löper högst upp på ledningsgatan som fungerar som åskledare. Normalt används stålaluminiumlinor (FeAl) som topplinor men även andra material kan användas, till exempel stållinor (Fe) (Svk 2012b, s.12; Svk 2015a, s.15).

2.4.1.2 Materialkrav

I den tekniska riktlinjen för luftledningsstolpar (TR05-03 utg.3) specificeras de krav som ställs på stolpar, bland annat vilka typer av material som skall användas och de hållfasthetskrav som ställs på dessa. Bland annat anges att allt stål som används till stolpar skall varmförzinkas (Svk 2015c, s.30). Trästolpar och träslipers ska, enligt riktlinjen, vara konstruerade av furu och tryckimpregnerade med MT-kreosotolja för att träet skall skyddas mot röta och skadedjur (Svk 2015c, s.11). Kreosot framställs genom torrdestillation av stenkolk och är en sammansättning av en rad olika ämnen, varav flera av dessa är hälsofarliga. Kreosot är klassificerat som cancerframkallande och användningen av ämnet regleras enligt svensk och europeisk lag.

2.4.1.3 Markbehov

Markbehovet för en luftledning beror på spänningsnivån, då det i regel krävs större och kraftigare stolpar vid högre spänning eftersom luftledningar ofta består av fler linor. Stamnätets ledningsgator skall vara trädsäkra vilket innebär att inga avbrott i elöverföring skall kunna ske till följd av träd som faller på ledningen eller växer upp i den. Det område längs luftledningen där all högväxande vegetation fälls kallas skogsgata och området direkt utanför skogsgatan kallas sidoområde. I sidoområdena kan det finnas så kallade farliga träd vilka måste fällas för att inte riskera att de ska falla på ledningen. För luftledningar som dras genom skogsmark innefattas både skogsgatan och sidoområdet i ledningsgatan. För 400 kV ledningar är bredden på skogsgatan 44 meter medan den för 220 kV ledningar är 40 meter (Svk 2014a, ss.30-31). Då luftledningsstolpar av julgranstyp används krävs en skogsgata på ca 35 meter (Svk 2010a, s.24).

2.4.2 Mark- och sjökabel

Vid byggnation av mark- och sjökablar används främst HVDC-teknik eftersom AC-kablar endast lämpar sig för kortare sträckor. I AC-kablar uppstår nämligen en stor fasförskjutning mellan ström och spänning då de tre faserna ligger relativt nära varandra, vilket medför att ju längre kabeln är desto mindre el går att ta ut från kabeln. Vid kortare avstånd, då det av tekniska skäl inte är möjligt att använda luftledning, används dock mark- eller sjökabel med AC-teknik (Svk 2015b, s.30). Ett exempel på detta är sjökabeln mellan Skåne och Själland, där AC-teknik är möjligt tack vare det begränsade avståndet (Svk 2015e, s.15).

Mark- och sjökablar är konstruerade med en ledare i mitten och ett lager med isolation kring denna. Utanpå isoleringen ligger ett lager av ytterligare en ledare, kabelskärmen, som ansluts till jord och som därmed kan liknas vid luftledningens topplina. För att undvika att vatten


tränger in i kabeln läggs en vattentätning, där det ofta används olika material för tvär- och längsvattentätning. Ytterst läggs ett lager av plast, yttermanteln, som fungerar som ett mekaniskt skydd för kabeln (Svk 2014a, s.31).

Den specifika uppbyggnaden och materialvalen varierar mellan olika kabelprojekt och olika tillverkare. Det finns med andra ord ingen standard för de kablar som används av Svenska kraftnät. Då en kabel skall utformas för mark- respektive sjöförläggning är det främst isolerings- och ledarmaterial som skiljer mellan olika projekt.

För stamnätsprojekt med HVDC-teknik finns det olika typer av tekniker för omriktarstationerna. Med hjälp av så kallad Voltage Source Converter (VSC), som bygger på spänningsstyrda transistorer, kan strömmen styras i valfri riktning. Det är främst denna teknik som används i de senaste kabelbyggnationerna i stamnätet. Två typer av kablar lämpar sig för VSC-tekniken, där isoleringsmaterialet utgörs av antingen plast (tvärbunden polyeten, XLPE) eller oljeimpregnerat papper (MI) (Svk 2013e, s.7). Mittenledaren brukar vanligtvis tillverkas av koppar eller aluminium. Vid val mellan isolering- och ledarmaterial är det flera parametrar som spelar in, bland annat termiska förutsättningar, tillåtna förluster, installation samt investeringskostnad (Svk 2013e, s.11).


Sett till ledarmaterial är kopparledare dyrare än aluminiumledare, men kräver en mindre ledararea, vilket medför att det behövs mindre material till de övriga lagren i kabeln (Worzyk 2009, s.10). En större ledararea ger dock lägre överföringsförluster. Till markkablar väljs ofta aluminiumledare på grund av det lägre priset och XLPE-isolering på grund av den lägre vikten. En lägre kabelvikt möjliggör transport av längre kabellängder, vilket i sin tur ger färre antal kabelskarvar (Svk 2013e, s.11). För sjökablar förekommer dock både kombinationer av koppar- eller aluminiumledare med XLPE- eller MI-isolering. Kablar med MI-isolering har en mer omfattande konstruktion än de med XLPE-isolering, vilket ger en högre investeringskostnad, men en lång teknisk livslängd (Svk 2010a, s.24; Svk 2010b, s.26; Svk 2013f, s.25).

För markkabel tillverkas ofta kabelskärmen av metallfolie eller metalltrådar av till exempel koppar. Tvärvattentätningen för markkabel kan bestå av till exempel aluminiumfolie, medan längsvattentätningen utgörs av svällband, som tätar genom att de sväller upp vid kontakt med vatten (Svk 2010a, s.24; Svk 2014a, s.31). Jordningen för markkablar sker vanligtvis vid varannan kabelskarv med så kallade jordlinor tillverkade av koppar. Denna jordning kan gå till på olika sätt, antingen genom att en jordlina löper längs hela kabeln, en så kallad följeledare, eller att jordkabeln läggs i bitar vid den aktuella jordningsplatsen (Svk 2013e, s.22). En principskiss samt ingående material för en HVDC-markkabel med XLPE-isolering visas i Figur 7.

	Ledare	Aluminiumledare med axiell vattentätning (koppar används normalt inte p.g.a hög kostnad)
	Isolation	HVDC-anpassad tvärbunden polyeten (DC-XLPE)
	Längsvattentätning	Svällband eller motsvarande
	Skärm	Koppartrådar eller motsvarande
	Längs/tvärvatten-tätning	Svällband och metallisk barriär
	Ytermantel	Högdensitets Polyeten (HDPE)
	Ytterdiameter, vikt	Cirka 90-120 mm, cirka 9-12 kg/m

Figur 7. Konstruktion för HVDC-markkabel med XLPE-isolering (Svk 2013e, s.11).

För sjökablar tillverkas kabelskärmen av bly, en så kallad blymantel, för att hindra att vatten tränger in i kabeln. Blymanteln agerar här som tvärvattentätning. Längsvattentätningen utgörs av svällband, på samma sätt som för markkablar (Svk 2010b, s.27). Sjøkablar har, på samma sätt som markkablar, en mantel av plast för att skydda kabeln. För att ge sjökabeln ett extra mekaniskt skydd mot de krafter som den utsätts för vid sjöläggning förstärks den med en armering av till exempel stål-, koppar- eller aluminiumtrådar. Utanpå armeringen läggs ytterligare en mantel, ytermanteln, som ofta består av asfaltimpregnerat polypropylengarn (Svk 2014a, s.32; Svk 2015e, s.16). Sjøkablar jordas utefter hela kabellängden genom den extra armering som finns i kabeln och det finns därför inget behov av en extern jordlina (Svk 2013e, ss.41-42). En principskiss samt ingående material för en HVDC-sjøkabel med MI-isolering visas i Figur 8.

	Ledare	Koppar med axiell vattentätning
	Isolation	Oljeimpregnerad cellulosa (papper)
	Längsvattentätning	Svällband eller motsvarande
	Tvärvattentätning	Blymantel
	Innermantel	PE-mantel (eller motsv.)
	Tryckarmering	Galvaniserade stålband
	Dragarmering	Galvaniserade ståltrådar, ett eller två lager
	Ytermantel	Asfaltimpregnerat polypropylengarn (PP) alternativt heltäckande PP-mantel
	Ytterdiameter/Vikt	Cirka 120-135 mm, cirka 40-55 kg/m

Figur 8. Konstruktion för HVDC-sjøkabel med MI-isolering (Svk 2013e, s.14).

2.4.2.1 Markbehov

Normalt sker förläggningen av markkablar genom att marken schaktas med hjälp av en grävmaskin. Det utrymme som krävs för bland annat grävmaskinen kring kabeldiket kallas arbetsområde och brukar vanligtvis uppgå till 15-20 meter. I detta område tas större träd, buskar och stubbar bort för att göra plats för arbetsfordon (Svk 2010b, ss.28-29,51). Bredden på kabeldiket varierar med markens material, men bottenbredden uppgår vanligtvis till ca 1 meter och bredden på kabeldiket i markplan till mellan 1,5-3 meter (Svk 2010b, ss.27-28). För att minimera risken för att kablarna skadas från bland annat rötter under drift hålls ett område på 8 meter kring kabeldiket fritt från större träd. Buskar och mindre träd får dock växa på området och jordbruk kan även bedrivas ovanför kabeldiket (Svk 2010b, s.38).

Sjökablar behöver, till skillnad från markkablar, inte grävas ner utan kan läggas direkt på sjöbotten. Vid strandkanten grävs eller sprängs dock ett kabeldike för att ge ett ökat skydd för både människor och kablarna. Vid platser där det krävs ett ökat skydd för kablarna även på större djup kan de täckas över med sten eller läggas i ett kabeldike som då har spolats i bottensedimentet (Svk 2014a, s.32).

2.4.3 Stamnätsstation

I elnätet finns olika typer av stationer med olika funktioner, där definitionen för en stamnätsstation är att den är kopplad till 220- eller 400 kV-ledningar. Vid en sammankoppling av två ledningar med samma spänning byggs en så kallad kopplingsstation. I denna station finns endast ett ställverk som innehåller komponenter för koppling, mätning, övervakning och styrning (Svk 2010b, s.25; Svk 2014a, s.33). Ska spänning transformeras mellan olika spänningsnivåer byggs istället en så kallad transformatorstation, där det utöver ställverk även krävs transformatorer. Vid en övergång från till exempel 400 kV-ledningar till 220 kV-ledningar byggs två ställverk. Ett 400 kV-ställverk dit 400 kV-ledningarna är kopplade samt ett 220 kV-ställverk dit 220 kV-ledningarna kopplas. Dessa ställverk sammankopplas av en 220/400 kV transformator som transformerar spänningen mellan 400 kV och 220 kV (Svk 2014a, s.33).

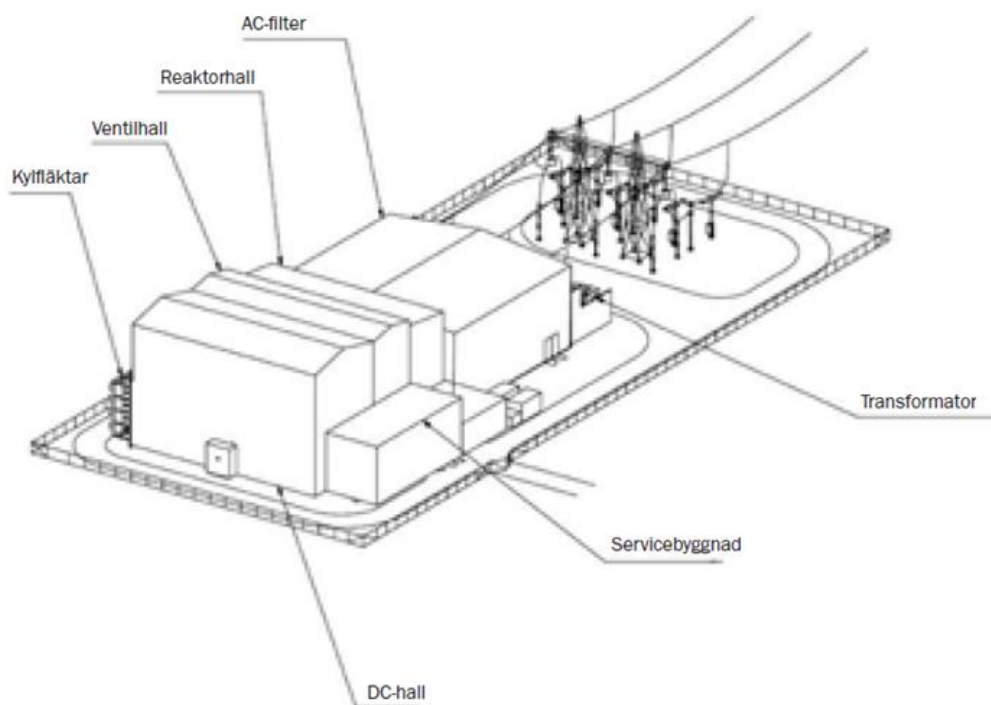
Det finns olika typer av ställverk, där en typ isoleras med hjälp av den omkringliggande luften, så kallade luftisolerade ställverk (AIS). Dessa tar relativt stor andel mark i anspråk, omkring 25 000 m² inhägnat område för ett 400 kV-ställverk med tre ledningsfack, ett transformatorfack och ett reaktorfack (Svk 2010b, ss.24-25). Per fack motsvarar detta ett markanspråk på omkring 5 000 m² för ett 400 kV-ställverk. Vid platsbrist kan istället gasisolerade ställverk (GIS) användas, vilka minskar markbehovet med ca 70 % jämfört med ett AIS- ställverk (ABB 2016a). Nackdelen med GIS-ställverk är dock att de isoleras med hjälp av svavelhexafluorid, SF₆, som är en mycket kraftig växthusgas då 1 kg SF₆ motsvarar 22 800 kg CO₂-ekvivalenter (Naturvårdsverket 2010). SF₆-gas återfinns även i de luftisolerade ställverken, bland annat som isolationsmedium i fränskiljande brytare, men i en mindre omfattning än i GIS-ställverken (Svk 2010b, s.25).

De luftisolerade ställverken som byggs idag har oftast två brytare per ledningsfack, så kallade tvåbrytarställverk, vilket möjliggör att delar av ställverket kan kopplas bort och underhållas under drift (Svk 2010c, s.23).

2.4.3.1 Omriktarstation

Vid en sammankoppling av en DC-ledning eller DC-kabel med AC-nätet krävs en station i varje ände där likström omvandlas till växelström och vice versa, en så kallad omriktarstation. Det är valet av teknik i denna station som avgör vilken typ av kabel som kan användas för överföring av el. Den teknik som Svenska kraftnät valt att använda i sina senaste HVDC-projekt är Voltage Source Converter, VSC, som växel- och likriktar strömmen med hjälp av spänningsstyrda transistorer (Svk 2010b, s.25). Utöver själva tekniken för omriktning krävs även ett ställverk för växelströmdelen, transformatorer och övrig utrustning så som till exempel kontrollbyggnad och reaktorer (Svk 2013e, s.9). En principiell skiss över hur en omriktarstation med ett ställverk kan utformas åskådliggörs i Figur 9.

En omriktarstation tar i regel mer mark i anspråk än en station med enbart växelströmställverk. Den totala markanvändningen för en omriktarstation beror i stor utsträckning på den aktuella utformningen av stationen. Markbehovet för omriktarstationer i det svenska stamnätet varierar mellan 2,5 - 12 ha. De omriktarstationer som Svenska kraftnät har byggt de senaste åren har dock tagit omkring 4 - 6 ha i anspråk (Svk 2006, s.20; Svk 2010a, s.40; Svk 2010b, s.24; Lövebrant 2012).



Figur 9. Principskiss över omriktarstation och ställverk (Svk 2010c, s.23).

2.4.3.2 Reaktor

Vid låglasttimmar på nätet, till exempel under natten, kan den genererade reaktiva effekten i en AC-ledning eller AC-kabel vara större än den konsumerade. Detta får till följd att spänningen i ledningen stiger, vilket kan ge upphov till problem om den tillåtna spänningsnivån (1,05 p.u.) som nätet kan hantera överskrids. För att undvika för höga spänningsnivåer kan en shuntreaktor anslutas. En shuntreaktor konsumerar reaktiv effekt och

kan vid behov kopplas in på nätet för att hålla en stabil spänningsnivå på ledningen. Shuntreaktorer används främst vid långa luftledningar och markkablar med höga spänningar och placeras mitt på eller i slutet av en ledning (ABB 2016b).

2.4.3.3 Kondensator

En shuntkondensator har den motsatta funktionen mot en shuntreaktor, det vill säga att producera reaktiv effekt. Shuntkondensatorer kopplas därför in på nätet då spänningen i ledningen är för låg och det krävs en produktion av reaktiv effekt för att på så sätt höja spänningen till över den acceptabla nivån (0,95 p.u.) (ABB 2016b).

2.5 Bygg-, drift- och rivningsfas av stamnätskomponenter

Livslängden hos en komponent i stamnätet kan delas upp i tre olika faser, bygg-, drift- och rivningsfas. I följande avsnitt beskrivs de olika faserna för respektive teknik.

2.5.1 Luftledning

Byggfasen inleds med att skogen i den aktuella skogsgatan avverkas och transportvägar byggs eller förstärks vid behov. Fundamenten anläggs sedan och hur stort arbete som krävs för detta beror på vad det är för typ av fundament som skall användas och vilket underlag som de skall placeras på. Därefter monteras och reses stolparna, vilket oftast sker med hjälp av en mobilkran. Jordlinan grävs sedan ner längs med ledningsgatan. Monteringen av faslinorna sker genom att en lina per fas dras ut med en bandvagn eller helikopter och de övriga linorna kan sedan kopplas i dessa och dras på plats med hjälp av speciella broms- och dragmaskiner (Svk 2014a, s.74).

Besiktning av luftledningar sker enligt Elsäkerhetsverkets författningssamling (ELSÄK-FS 2008:3). Enligt denna skall luftledningar för högspänning besiktas minst en gång per år (Larsson 2008). Den årliga driftbesiktningen sker vanligtvis med helikopter och luftledningen studeras då översiktligt. En mer grundlig besiktning sker vart åttonde år då bland annat stolpar, stag och linor kontrolleras från marken. Ytterligare besiktningar kan dock förekomma vid behov, till exempel i och med en ökad ålder hos ledningen (Svk 2014a, ss.76-77).

Underhåll sker dels tekniskt och dels genom röjning av vegetation. Det tekniska underhållet utförs utifrån besiktningarna, till exempel om det upptäcks att någon komponent i luftledningen behöver bytas ut. Röjningen sker kontinuerligt för att undvika att ledningen skadas genom högt växande träd. I skogsgatan röjs all högväxande vegetation som kan utgöra en risk för driften av ledningen, medan lågväxande träd och buskar får stå kvar. De träd som utgör en fara för ledningens drift i sidoområdena fälls eller toppas med hjälp av helikopter. Övrig röjning sker främst manuellt med hjälp av röjsåg (Svk 2014a, ss.76-77).

Då en luftledning rivs tas först linorna av och därefter lyfts stolparna bort. Fundamenten tas bort till ett djup av 0,5 meter medan resterande del av fundamenten lämnas kvar i marken, eftersom en upptagning av dessa skulle medföra en stor påverkan på marken (Svk 2010c, s.69).

2.5.2 Markkabel

Vid anläggning av en markkabel schaktas ett kabeldike med hjälp av till exempel en grävmaskin. I den utsträckning som det är möjligt anläggs kablar utefter vägar, vilket minskar behovet av skogsavverkning. Kablarna läggs på ett underlag av sand som transporteras till kabeldiket, även uppschaktade sandmassor används då dessa är lämpliga för ändamålet. Återfyllning av kabeldiket sker i största möjliga mån med de uppschaktade massorna (Svk 2010a, s.28). För utläggning av kabel krävs speciella fordon som klarar av vikten av de tunga kablarna och kabeltrummorna. På grund av begränsningar för hur tunga kablar som kan transporteras måste kablarna delas upp i mindre delar och skarvas i kabeldiket med kabelskarvar. Vid dessa skarvplatser kan det krävas fundament i form av betongplattor (Svk 2014a, s.75). Skarvningen sker ungefär med en kilometers mellanrum med hjälp av prefabricerade skarvar (Svk 2010b, s.37).

Besiktning av markkabel sker genom en årlig kontroll och en mer grundlig underhållsbesiktning utförs vart åttonde år, enligt Elsäkerhetsverkets författningssamling (ELSÄK-FS 2008:3). Besiktning genomförs med hjälp av radar och eventuella fel åtgärdas (Larsson 2008; Svk 2010b, s.101). Vid den årliga kontrollen ses det även över om det krävs avverkning inom den åtta meter breda skogsgatan. Planerat skogligt underhåll sker var fjärde år då skadlig växtlighet röjs bort (Svk 2014b, s.28). De ingående materialen i markkablarna kan material- eller energiåtervinnas vid en framtida avveckling (Svk 2010b, s.26).

2.5.3 Sjökabel

Anläggning av sjökabel sker med ett speciellt fartyg som kan hantera den stora vikten från kablarna och kabeltrummorna. Detta fartyg placerar ut kabeln på havsbotten och ett mindre fartyg gräver eller spolrar sedan ner kabeln i ett kabeldike för extra skydd. Är underlaget sådant att grävning eller spolning inte är möjligt kan kabeln täckas med till exempel sten eller betongmattor (Svk 2013e, s.32). Vid reparation av en sjökabel byts den trasiga delen av kabeln ut och en ny kabeldel sätts dit med hjälp av skarvar (Svk 2013f, s. 40). Vid en framtida rivning av sjökablarna kan de ingående materialen material- eller energiåtervinnas (Svk 2010b, s.26).

2.5.4 Station

Byggnation av stationer sker genom att eventuell skog på det aktuella området avverkas och att vägar byggs eller förstärks vid behov. Därefter byggs fundament för kontrollbyggnader, stolpar och tyngre komponenter så som transformatorer och reaktorer. Sedan monteras de olika delarna i ställverket och slutligen lyfts de tyngre komponenterna på plats, vilket kräver speciella fordon som klarar den tunga vikten (Svk 2014a, s.75). För besiktning av stationer anges det i ELSÄK-FS 2008:3 att de skall ske med intervall om högst ett år (Larsson 2008).

3 Utformning av miljövärderingsverktyg

I följande avsnitt presenteras de valda systemgränserna för livscykelanalysen och den ekonomiska värderingen av miljöpåverkanskategorierna. Vidare beskrivs även antaganden för implementerad indata för material- och resursutnyttjandet i bygg, drift och rivningsfasen.

De komponenter i stamnätet som implementerats i miljövärderingsverktyget redovisas i Tabell 4. Miljövärderingsverktyget har utformats i Excel där användaren anger indata för de studerade stamnätskomponenterna. För samtliga projekt anges allmän indata för bland annat ledningssträcka, region och andel skog. Ytterligare specifik indata kan sedan anges beroende på hur mycket information som finns kring det aktuella investeringsprojektet. Är projektet i ett tidigt stadie kan förvalda inställningar användas.

Tabell 4. Inkluderade komponenter i miljövärderingsverktyget.

Komponent	Teknik	Spänning	Effekt	Kommentar
Luftledning	AC	220 kV		Portalstolpe typ A (stål)
		400 kV		
	HVDC	500 kV		Julgransstolpe (stål)
Markkabel	AC	400 kV		Cu-ledare
	HVDC	300 kV	700 MVA	Al-ledare, XLPE-isolering
Sjökabel	HVDC	300 kV	700 MVA	Al/Cu-ledare, XLPE-isolering
Ställverk	AC	220 kV		AIS eller GIS
		400 kV		AIS eller GIS
Omriktarstation	HVDC			
Transformator			750 MVA	
			500 MVA	
			250 MVA	
Reaktor			150 MVA _r	
Kondensator			165 MVA _r	

3.1 Systembeskrivning

I följande avsnitt beskrivs livscykelanalysens avgränsningar och antaganden utifrån det första steget i analysen, vilket bland annat innefattar systemgränser och allokeringmetoder.

3.1.1 Val av systemgränser

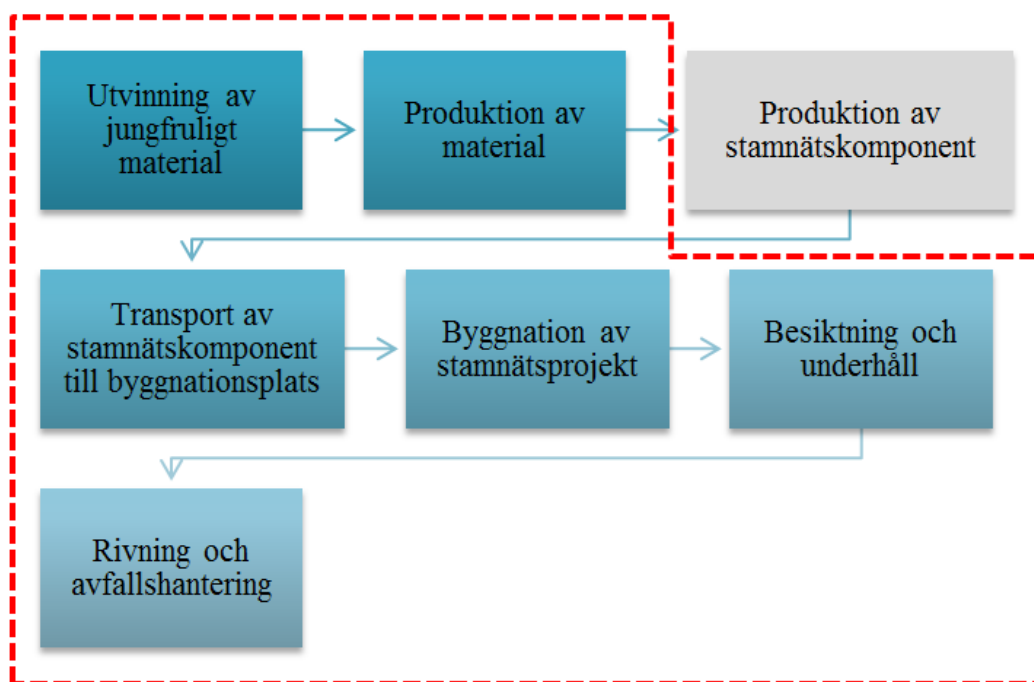
I denna analys har den funktionella enheten valts till 1 km byggd ledning eller kabel med livslängd på 40 år. Stationer har antagits vara nödvändiga för driften av ledningarna och har därför innefattas i samma analys och funktionella enhet. Den tekniska livslängden har antagits till 40 år för alla komponenter eftersom det är den ungefärliga livslängden som vanligtvis

anges för stationskomponenter. En djupare studie kring specifika komponenters livslängd har legat utanför tidsramen för detta arbete. För att möjliggöra analys av ett helt projekt har den tekniska livslängden därför angetts utifrån stationskomponenterna, som har den kortaste livslängden i stamnätet. Eftersom det endast är miljöpåverkan under drifttiden som påverkas av livslängden har denna avgränsning troligtvis begränsad påverkan på den totala miljöpåverkan. Den tekniska livslängden för stamnätskomponenterna finns dock som indata i verktyget och är därmed enkel för användaren att ändra om mer information erhålls kring teknikernas livslängd.

Referensfallet till analysen, det vill säga det som sker om investeringen inte genomförs, har vid nya investeringar antagits vara att projektet inte genomförs och att ingen komponent byggs. Referensfallet till reinvesteringar har antagits vara att ledningen eller kabeln måste tas ur drift på grund av till exempel bristande säkerhet eftersom reinvesteringen inte genomförs.

Denna studie har genomförts som en ALCA då det ses vara lämpligt att genomföra en sådan studie vid en jämförande analys mellan olika lösningar på ett problem, vilket denna LCA har till syfte att göra (Röös, Patel & Spångberg 2015). Livscykeln för det studerade systemet samt vald systemgräns visas i Figur 10.

Systemgränserna har dragits till att innefatta brytning av nytt material, tillverkning av materialen, transport av elnätskomponenter till byggnationsplatsen, byggnation och drift av elnätskomponenten samt rivning och avfallshantering. För driften av stamnätskomponenterna ingår besiktning samt tekniskt och skogligt underhåll. I denna fas ingår även utebliven koldioxidinlagring till följd av avverkning av skog. Ingen allokering har genomförts för biprodukter utan dessa har hanterats enligt cut-off kriteriet, vilket även valdes som allokeringsmetod i Ecoinvent.



Figur 10. Livscykel och vald systemgräns för det studerade systemet (streckad linje).

De flesta tillverkarna av elnätskomponenter till det svenska stamnätet har produktionsanläggningar i Sverige eller Europa och avfallshanteringen kan antas ske i Sverige. Produktions- och avfallsanläggningar inom dessa områden har därför i första hand valts i livscykelanalysen. Vid de processer som sådana geografiska indata har saknats har globala produktionsprocesser valts.

3.1.1.1 Ingående material och återvinning

För att erhålla information kring hur olika material i stamnätskomponenterna återvinns har bland annat miljökonsekvensbeskrivningar samt rivningsplaner från Svenska kraftnät studerats. Avfallshanteringen för respektive material redovisas i Tabell 5 och beskrivs mer ingående i följande stycken.

All koppar, aluminium, bly och stål som ingår i olika stamnätskomponenter lämnas till materialåtervinning. En liten andel av stålet lämnas dock kvar i marken eftersom inte hela fundament grävs upp. Denna andel ses dock vara försumbar jämfört med de stora stålkonstruktioner som i övrigt ingår i stamnätskomponenterna. Zinket som ingår i stamnätskomponenterna lämnas till materialåtervinning, vilket antas uppgå till 100 % av den totala konstruktionsvikten.

Det har antagits att all betong lämnas på deponi eftersom den betong som inte grävs upp lämnas i marken, vilket har antagits vara en form av deponi. De träsyllar som används i fundament lämnas i marken och all träsyll och kreosot antas därför deponeras. Sanden som används vid till exempel kabelförläggning antas lämnas i marken vid rivning, vilket har approximerats med deponi. Miljöpåverkan från deponeringen av sanden har dock antagits vara försumbar.

Till skillnad från till exempel metaller försämras plasternas egenskaper då de återvinns och eftersom det ställs höga kvalitetskrav på till exempel högspänningskablar har det antagits att tillverkningen av dessa endast sker från ny plast. Det är svårt att återvinna plaster i bland annat kablar eftersom de behandlats med olika ämnen samt i vissa fall tvärbundits (Worzyk 2009, s.262). Det polyeten, polypropylen, silikongummi och epoxiharts som ingår i kablar och stationskomponenter antas därför energiåtervinnas genom förbränning.

Avfallshantering för silikongummi och epoxiharts saknas i Ecoinvent men eftersom de båda är en typ av polymer har de antagits ha liknande miljöpåverkan som förbränning av polypropylen.

Glasfiber skickas till deponi och färgrester, vilka hanteras som farligt avfall, skickas även de till deponi. Det bitumen och papper som ingår i stamnätskomponenterna antas energiåtervinnas genom förbränning. Glas och porslin i isolatorer lämnas på deponi då det inte är möjligt att återvinna dessa efter användning som komponent i luftledning (Svk 2010d, s.113). Miljöpåverkan för deponi av porslin saknas dock i Ecoinvent och har därför antagits ha liknande miljöpåverkan som deponi av glas.

Vid tillverkning och rivning av stationskomponenter med SF₆-gas sker ett läckage på omkring 0,5 % respektive 1,0 % av gasen. Under drifttiden sker ett årligt läckage på ca 0,1 %

och eftersom stationskomponenterna antas ha en livstid på ca 40 år uppgår det totala läckaget under drifttiden till 4 %. Totalt sett under hela livscykeln läcker omkring 5,5 % av SF6-gasen ut till omgivningen. Den återstående SF6-gasen, omkring 94,5 %, skickas till återvinning (ABB 2006; Arnell 2010). Den SF6-gas som fylls på vid byggnation antas vara ny gas medan den återvunna gasen från rivning kan ses användas till återfyllnad under komponenternas livstid. SF6-gasen som används till återfyllnad har därför inte tagits hänsyn till i verktyget utan antas täckas upp av den återvunna gasen. Vid rivning av transformatorer skickas transformatorolja till återvinning.

Vid tillverkning av vissa material, till exempel metaller, tas en viss andel råmaterial från återvunnet material från världsmarknaden och en viss andel tas från jungfruligt material, det vill säga sådant material som brutits som nytt. Hur stor andel som tas från jungfruligt material vid tillverkning har antagits utifrån ett medelvärde för europeisk produktion och presenteras i Tabell 5.

Tabell 5. Andelen ingående jungfruligt material vid tillverkning av stamnätskomponenter samt avfallshantering vid rivning.

	Ingående material		Avfall	
	Jungfruligt material	Återvinning	Förbränning - energiåtervinning	Deponi/läckage
Aluminium	50 % ^a	100 %		
Betong	100 %			100 %
Bitumen	100 %		100 %	
Bly	40 % ^b	100 %		
Glasfiber	100 %			100 %
Isolatorglas	100 %			100 %
Koppar	55 % ^c	100 %		
Kreosot	100 %			100 %
Papper	100 %		100 %	
Polyeten	100 %		100 %	
Polypropylen	100 %		100 %	
Porslin	100 %			100 %
Sand	100 %			100 %
SF6	100 %	94,5 %		5,5 %
Silikongummi	100 %		100 %	
Stål	45 % ^d	100 %		
Transformatorolja	100 %	100 %		
Träsyll	100 %			100 %
Zink	60 % ^e	100 %		
Färg	100 %			100 %
Epoxiharts	100 %		100 %	

^a(EAA & OEA 2006, s.36), ^b(ILA 2016), ^c(SCDA 2016), ^d(BIR 2015, s.15), ^e(IZA 2010, s.11).

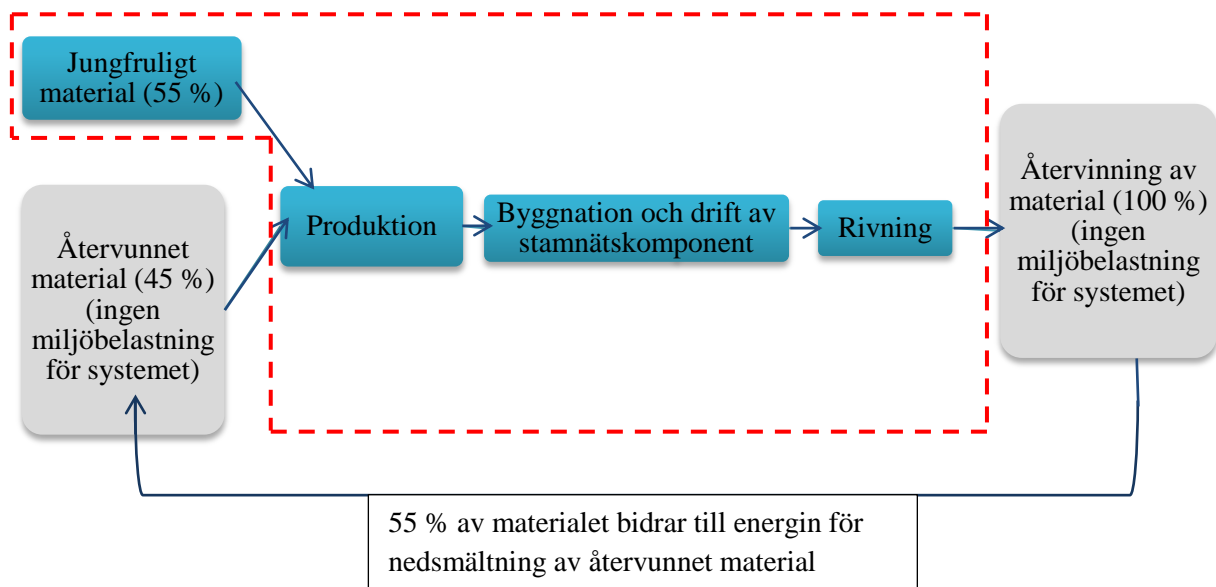
Vid cut-off metoden, som använts i detta arbete, antas att allt återvunnet material på marknaden är fritt att använda vid produktion utan någon miljöbelastning för systemet. Detta kan antas eftersom det studerade systemet bidrar med lika stor mängd återvunnet material

tillbaka till marknaden vid rivning av komponenterna (Ecoinvent 2016; Klöpffer & Grahl 2014, ss.104-105).

Resursåtgången för att utvinna jungfruligt material läggs därmed på den första användningen av materialet. För produktion av stamnätskomponenter belastas alltså systemet med miljöpåverkan från den andel av materialet som tas från jungfruligt material, medan det material som tas från världsmarknaden i form av återvunnet material inte ger någon miljöpåverkan för systemet. Rivningsarbetet av stamnätskomponenter ger dock en miljöbelastning för det studerade systemet, medan återvinningen av materialen inte belastar systemet eftersom det antas gå direkt tillbaka till världsmarknaden.

Denna typ av hantering av återvunnet material har genomförts i andra LCA-studier för elnät (Jorge 2013, s.514) och det har därför antagits att det är ett rimligt antagande även för denna studie. I det tidigare miljövärderingsverktyget hanterades även avfallet enligt en liknande princip (Lövebrant 2012, s.18).

Enligt tidigare antaganden och Tabell 5 är det endast metaller som materialåtervinns vid rivning och därefter används vid produktion av nytt material. Detta går även i linje med denna avgränsning eftersom det endast är metaller som kan återvinnas ett flertal gånger utan minskad materialkvalitet. För de metaller som ingår i stamnätskomponenterna har det antagits att 100 % av metallerna återvinns. Avgränsningen kan illustreras med ett exempel som visas i Figur 11 och som beskrivs mer ingående i följande stycke.



Figur 11. Antagande kring hantering av avfall och återvinning i det studerade systemet, då 100 % av materialet återvinns. Den streckade linjen visar systemgränsen, där processer innanför strecket ger en miljöbelastning för systemet.

För en stamnätskomponent som innehåller koppar tillverkas komponenten av 55 % jungfruligt material och 45 % återvunnet material, enligt Tabell 5. Miljöbelastningen för att utvinna detta jungfruliga material läggs på det studerade systemet. De resterande 45 % av den ingående kopparn är återvunnet och tas från marknaden utan någon miljöbelastning för systemet. Systemet belastas sedan för miljöpåverkan från transporter, byggnation, drift och rivning av stamnätskomponenten.

Efter rivningen materialåtervinns 100 % av kopparn utan någon miljöbelastning för systemet. Eftersom den ingående kopparn vid produktion av stamnätskomponenten endast utgörs av 45 % återvunnet koppar återvinns 55 % mer koppar i systemet än vad som nyttjades vid tillverkningen av stamnätskomponenterna. Denna andel ses dock, enligt resonemanget ovan, täcka upp för den energi som krävs för att smälta ner det återvunna materialet.

Då avfallet deponeras eller energiåtervinns genom förbränning belastas det studerade systemet med den miljöpåverkan som detta ger. De eventuella positiva effekterna, så som ökad elproduktion vid förbränning med energiåtervinning exkluderas från det studerade systemet och tillfaller därmed marknaden. Systemavgränsningen ses ha begränsad påverkan på det studerade systemets totala miljöpåverkan och avgränsningen går även i linje med den valda allokeringsmetoden i Ecoinvent.

Systemets miljöbelastning för de material som deponeras eller energiåtervinns genom förbränning efter rivning illustreras i Figur 12. Ett exempel på ett sådant material i stamnätskomponenter är porslin, där 100 % av det ingående materialet tas från nytt material, vilket ger en miljöbelastning för systemet. Det studerade systemet belastas sedan för miljöpåverkan från transporter, byggnation, drift och rivning av stamnätskomponenten. Efter rivningen deponeras 100 % av porslinet, vilket även det ger en miljöbelastning för systemet



Figur 12. Antagande kring hantering av avfall och återvinning i det studerade systemet då 100 % av avfallet deponeras eller förbränns. Den streckade linjen visar systemgränsen, där processer innanför strecket ger en miljöbelastning för systemet.

3.1.2 Val av miljöpåverkanskategorier

Den kategoriseringsmetod som valts för denna analys är ReCiPe 2008, som finns med tre olika tidsperspektiv; individualistiskt, hierarkiskt och egalitärt perspektiv. Det individualistiska perspektivet avser en kort tidsperiod, tar endast hänsyn till miljöpåverkan som är obestridda och har en optimistisk syn på den framtida teknikutvecklingen och människors anpassning. För detta val av tidsperspektiv analyseras till exempel klimatpåverkan utifrån 20 år. Det hierarkiska perspektivet baseras på rådande politiska ställningstagande och studerar klimatpåverkan utifrån 100 år. Det egalitära tidsperspektivet går efter försiktighetsprincipen och utgår från att det är nödvändigt att tänka utifrån den värsta utgången. Detta tidsperspektiv tar bland annat hänsyn till fler miljökonsekvenser, även de som är bestridda i viss mån. Det egalitära tidsperspektivet studerar klimatpåverkan utifrån ett 500-årsperspektiv.

Det hierarkiska tidsperspektivet stämmer bäst överrens med det studerade systemet i detta arbete, bland annat eftersom miljöpåverkan från elnätskomponenterna sträcker sig över en längre tidsperiod än 20 år. ReCiPe 2008 med hierarkiskt perspektiv har valts som metod för denna analys, vilket även är det perspektiv som rekommenderas som standard (Goedkoop m.fl. 2009). Metoden valdes även i det tidigare miljöpåverkansverktyget och det var därför önskvärt att ha samma metod även i det vidareutvecklade verktyget för att få konsistens mellan versionerna (Lövebrant 2012).

De miljöpåverkanskategorier som ansetts vara relevanta för denna livscykelanalys är

- klimatpåverkan över 100 års-perspektiv (global warming potential, GWP_{100}) (kg CO₂-ekvivalenter)
- partikelformering (kg PM₁₀-ekvivalenter)
- förurning (kg SO₂-ekvivalenter)
- övergödning (kg P-ekvivalenter).

Ingen miljöpåverkanskategori har valts för endpoint eftersom dessa har ansetts ge stor osäkerhet i det slutliga resultatet. Framförallt på grund av att indata till många av dessa miljöpåverkanskategorier är svåra att uppskatta, till exempel antal boende inom visuellt område vid en ledningsgata. En studie visade även att endast 3 av 11 endpoint miljöpåverkanskategorier ansågs vara tillförlitliga, medan 14 av 15 midpoint miljöpåverkanskategorierna rekommenderades varav samtliga som valts att studeras i denna analys ingick (Hauschild 2012). Det ses även vara en stor risk för dubbelräkning av vissa miljöpåverkanskategorier så som visuell påverkan, mänsklig hälsa och buller eftersom Svenska kraftnät bland annat köper de fastigheter som ligger för nära en ledningsgata. De betalar även ut en ersättning för miljöskada, vilket till exempel kan vara att utsikten försämras markant. Dessutom dras ofta ledningsgatorna runt vissa områden för att ge en så liten påverkan som möjligt. Åtgärder för att till exempel undvika denna visuella påverkan tas inte med i analysen och den totala miljöpåverkan som erhålls från miljövärderingsverktyget skulle då bli högre än den verkliga miljöpåverkan (Svenska kraftnät 2013a, s.32).

Många av de miljöpåverkanskategorier som inte tagits med i analysen, så som markanvändning, visuell påverkan, mänsklig hälsa och buller, analyseras i de

miljökonsekvensbeskrivningar som genomförs vid stamnätsprojekt. Dessa kategorier belyses därmed i något hänseende vid analysen av en investering, men värderas istället kvalitativt.

3.1.3 Val av resultattolkning

För denna livscykelanalys har en känslighetsanalys genomförts. De parametrar som har studerats i känslighetsanalysen är transportsträcka för materialtransport, ekonomisk värdering samt markanvändning, vilket beskrivs utförligare i avsnitt 4.4.

3.1.4 Val av ekonomisk värdering

De implementerade schablonvärdena för utsläpp av koldioxid-, partikel-, svaveldioxid- och fosforekvivalenter i miljövärderingsverktyget har baserats på den ekonomiska värderingen i Noring (2014) och presenteras i Tabell 6. För att kvalitetssäkra värdena, då det alltid råder en viss osäkerhet vid ekonomiska värderingar, har även den ekonomiska värderingen i Trafikverket (2016 a,b,c) och Naturvårdsverket (2009) studerats.

I Noring (2014) värderas olika utsläpp i monetära termer med syftet att värderingen skall användas vid kostnadsnyttoanalyser, liknande de som genomförs på Svenska kraftnät. Värderingen är även anpassad för att användas vid livscykelanalyser och är utformad för värdering av miljöpåverkanskategorier, bland annat CO₂-ekvivalenter (Noring 2014). Värderingen bygger på en tidigare presenterad värderingsmetod, Ecovalue08, som utgår från svenska förhållanden (Ahlroth & Finnveden 2011; Pizzol m fl 2014). I Noring (2014) uppdaterades Ecovalue08 och vidareutvecklades till att innehålla fler miljöpåverkanskategorier. Detta utfördes med hjälp av CV-metoden genom att undersöka betalningsvilja för att undvika effekter av utsläppen (Noring 2014, ss.5-9). Ecovalue08 har analyserats i en nyligen genomförd studie där det betonas att CE-metoden är att föredra framför CV-metoden, men Ecovalue2008 bedömdes trots detta ha hög relevans för monetär värdering av livscykelanalyser (Pizzol m fl 2014). Värderingen består av nio miljöpåverkanskategorier, bland annat klimatpåverkan, partikelformering, förurning och övergödning (Noring 2014, s.22).

Värderingen i Noring (2014) anges ursprungligen i Euro för 2012-års prisnivå, men har i detta arbete räknats om till SEK i 2014-års prisnivå. Omräkning till ett gemensamt basår har genomförts för att erhålla värden i reala termer där inflationen har räknats bort, för att kunna jämföra värden vid olika tidsperioder med varandra. Omräkningen sker utifrån ett mått på den allmänna prisökningen av konsumtionsvaror i samhället, det så kallade konsumentprisindexet (KPI). Rekommendationer för uppräkningsfaktor med 1,5 % per år vid värderingar via betalningsvilja har används för omräkning till ett gemensamt basår (Trafikverket 2016d, s.5). Omräkningen till SEK har genomförts med en kurs för EURO på 9,17 SEK (Sveriges riksbank 2016).

En myndighetsgemensam monetär värdering av miljöpåverkan saknas i Sverige, men många svenska myndigheter använder sig av värderingen i Trafikverket (2016 a,b,c). Rapporten presenterar de förutsättningar som skall gälla för Trafikverkets analyser och kalkylvärdena uppdateras årligen. Den senaste rapporten är ASEK 6 där värdena anges i SEK i 2014-års prisnivå. Det är bland annat de effekter som luftföroreningar och koldioxid ger upphov till som värderas monetärt i denna rapport (Trafikverket 2016a, ss.3-6).

I Trafikverket (2016c) har värderingen av utsläpp av koldioxid genomförts utifrån ett så kallat politiskt skuggpris som är härlett från den svenska koldioxidskatten. Det beskrivs dock att bland annat den begränsade kunskapen kring koldioxidens framtida påverkan på klimatet medför svårigheter att värdera priset på utsläpp av koldioxid.

Värdering för effekterna av luftföroreningar i Trafikverket (2016b) har delats in i lokal och regional nivå. Värderingen för de regionala effekterna har ansetts vara bäst lämpade för detta arbete då de främst ser till de naturskadeeffekter som uppstår till följd av luftföroreningarna, så som försurning och övergödning. I Trafikverket (2016b) värderas de regionala effekterna utifrån åtgärds kostnader för att uppnå politiskt uppsatta miljömål. Små partiklar ($PM_{2,5}$), värderas i studien, där de lokala effekterna studeras utifrån hur många personer som exponeras för partiklarna. Då de flesta partikelutsläppen under stamnätskomponenternas livstid sker på platser där relativt få antal människor vistas har schablonvärden valts utifrån en referensort med 4 000 invånare (Trafikverket 2016b, s.5)

En värdering för fosfor saknas i Trafikverket (2016a) och en rapport som genomförts av Naturvårdsverket har därför studerats, där värderingen utgår från betalningsviljan för minskad tillförsel av fosfor till kusten (Naturvårdsverket 2009, s.8).

Utifrån Tabell 6 ses att värderingarna från de tre studierna ligger inom samma storleksintervall. De värden som främst skiljer sig åt är värderingen för partiklar, vilket kan förklaras med att värderingen i Noring (2014) ser till alla partiklar mindre än 10 mikrometer (PM_{10}), medan värderingen i Trafikverket (2016b) endast studerar de främst hälsofarliga inandningsbara partiklarna ($PM_{2,5}$). I Ecoinvent presenteras utsläppen av partiklar i PM_{10} -ekvivalenter vilket rättvårdigar att använda värderingen i Noring (2014). I Noring (2014) presenteras ett brett intervall för värderingen av utsläpp av koldioxidekvivalenter, men där värderingen i Trafikverket (2016c) ligger inom detta intervall.

I Tabell 6 presenteras även de schablonvärden som implementerats i värderingsverktyget för utsläpp av koldioxid-, partikel-, svaveldioxid- och fosforekvivalenter i SEK för 2014-års prisnivå. Värderingen som presenteras i Noring (2014) har valts till detta arbete utifrån att det är en vetenskaplig studie som är specifikt utformad för CBA och LCA. Studien är dessutom anpassad utifrån Recipe2008 och värderas i kg ekvivalenter, vilket stämmer överrens med de utsläpp som skall värderas i denna livscykelanalys. Denna värdering presenterar även ett värde för PM_{10} -ekvivalenter, vilket saknas i värderingen i Trafikverket (2016b). Schablonvärdet för koldioxid har antagits utifrån värderingen i Trafikverket (2016c) då det generellt är svårt att värdera utsläpp av koldioxid, men där denna värdering bygger på den svenska koldioxidskatten och samtidigt ligger inom intervallet som presenteras i Noring (2014).

Tabell 6. Sammanställning av värdering av utsläpp av koldioxidekvivalenter (CO₂-ekv), partikelekvivalenter (PM₁₀-ekv), svaveldioxidekvivalenter (SO₂-ekv) och fosforekvivalenter (P-ekv).

Miljöpåverkanskategori	Schablonvärde	Implementerade värden	Enhet
Klimatpåverkan	0,10 – 5,9 ^a	1,14 ^b	kr/kg CO ₂ -ekv
	1,14 ^b		kr/kg CO ₂
Partikelformering	283 ^a	283 ^a	kr/kg PM ₁₀ -ekv
	1 074 ^b		kr/kg PM _{2,5}
Försurning	31,5 ^a	31,5 ^a	kr/kg SO ₂ -ekv
	29 ^b		kr/kg SO ₂
Övergödning	703 ^a	703 ^a	kr/kg P-ekv
	1 023 ^c		kr/kg P

^a Noring (2014), ^b Trafikverket (2016b,c), ^c Naturvårdsverket (2009).

3.2 Indata från inventeringsanalys (LCI-data)

Materialdata för de olika komponenterna i stamnätet har bland annat erhållits från rapporter och materialblad från olika tillverkare. Komponenterna har antagits ha liknande konstruktion och materialåtgång oavsett leverantör och materialdata från en tillverkare är därmed representativt även för andra tillverkare. Materialdata för respektive elnätskomponent presenteras i Appendix A.

3.2.1 Luftledning

De ingående materialen till de luftledningar som har införts i miljövärderingsverktyget har valts i samråd med anställda på Svenska kraftnät, intern projektdokumentation från investeringar som genomförts under de senaste åren samt tekniska riktlinjer för ledningar. De valda materialen ska spegla de nybyggnationer och reinvesteringar som sker i stamnätet idag.

3.2.1.1 AC-luftledning

I verktyget har användaren möjlighet att välja lintyp, material, antal ledare och ledarearea beroende på spänningsnivå, vilket presenteras i Tabell 7. Ytterligare teknisk specifikation och valmöjligheter som implementerats i verktyget för luftledningar presenteras i Appendix B. För 400 kV-luftledning följer Svk en utarbetad ledningsstandard där materialen har implementerats i verktyget utifrån denna. För 220 kV ledningar finns dock ingen sådan standard och material och areor har därför valts utifrån dokumentation beskriven i avsnitt 3.2.1 samt utifrån den tekniska riktlinjen för linor (Svk 2012a).

För 400 kV-ledningar används portalstolpar med stag (A-stolpe) i stor utsträckning och denna stolptyp har därför valts som standard för 400 kV-ledningarna i verktyget (Carlschem 2016). Fundamenten för portalstolpar varierar med underlaget och tre typer av fundament för A-stolpar har därför implementerats i verktyget; kreosotimpregnerat träsyll-, prefabricerat betong- samt platsgjutet betongfundament. Skillnaderna mellan en A- och en B-stolpe är relativt små och det förekommer dessutom variationer i utformningen av stolparna inom samma stolpkategori. Med bakgrund i detta har endast en uppskattad materialåtgång för

A-stolpar införts i verktyget vilket dock antas vara en tillräckligt god approximation för materialåtgången för en B-stolpe.

De stolpar som har valts för 220 kV-ledningarna i miljövärderingsverktyget är stålstolpar (A-stolpar) med fundament av antingen prefabricerad betong, platsgjuten betong eller kreosotimpregnerade träslipers. Trästolpar har valts att bortses från i verktyget eftersom de flesta nya 220 kV-ledningar byggs med stålstolpar (Svk 2015f, s.15). I dagsläget används dock trästolpar i vissa reinvesteringar i stamnätet, men vid dessa projekt genomförs det sällan någon CBA eller miljövärdering, eftersom det oftast är uppenbart att investeringen kan motiveras ur ett samhällsekonomiskt perspektiv.

Avståndet mellan stolparna i en luftledning, spannlängden, varierar med markförutsättningar, stolptyp samt omgivning. Medelvärde för spannlängden för en luftledning med A-stolpar har utifrån uppgifter från olika ledningsprojekt antagits till ca 330 meter, det vill säga tre stolpar per kilometer (Svk 2010e, s.10; Svk 2013b, s.25). Eftersom portalstolpar har två ben medför detta sex fundament per kilometer luftledning.

Tabell 7. Sammanställning av de val som går att genomföra i miljövärderingsverktyget för AC-luftledning för 220 kV och 400 kV.

Stolpe	Material	Typ	Val av fundament
220 kV / 400 kV	Stål	Portalstolpe typ A	Kreosotimpregnerad träsyll Prefabricerad betong Platsgjuten betong
Ledare	Material	Ledararea (mm ²)	Typ av ledning
Faslina	FeAl	454; 593; 774; 910	Simplex; duplex; triplex
	Al-59	454; 593; 774; 910	Simplex; duplex; triplex
Topplina	FeAl	142; 241; 319	
	Fe	52; 68; 319	
Markledare	Cu	50; 70	

3.2.1.2 HVDC-luftledning

I samråd med anställda på Svenska kraftnät har en HVDC-luftledning med spänningsnivå på 500 kV implementerats i verktyget. Ledningen har utformats som en triplexledare med faslinor av legerat aluminium (3x774 mm² Al-59), markledare av koppar (50 mm²) och topplina av aluminium. HVDC-luftledningar byggs ofta med julgransstolpar med betongfundament, vilket har valts som standard i verktyget (Carlskem 2016).

3.2.2 Kabel

I följande avsnitt presenteras de kablar som har implementerats i miljövärderingsverktyget och i Tabell 8 ges en sammanfattning av de olika kabeltyperna. Materialåtgången för samtliga kablar i miljövärderingsverktyget är något lägre än den faktiska åtgången eftersom kabelskarvar har utelämnats. Denna avgränsning bedöms dock inte ha en betydande inverkan på den totala miljöpåverkan. Vid markförläggning av kabel skyddas kablarna med ett lager

sand. Massan sand har beräknats utifrån miljökonsekvensbeskrivningar av kabelprojekt. Generellt krävs det en större mängd sand för förläggning av AC-markkabel jämfört med HVDC-markkabel eftersom AC-markkabeln har ett bredare dike till följd av fler antal kablar. Sanden har antagits vara så kallad kabelsand med en densitet på 1400 kg/m³ (Snabbgrus 2016).

3.2.2.1 AC-markkabel

Antaganden för AC-markkabel har gjorts utifrån det tidigare genomförda examensarbetet på Svenska kraftnät. I samråd med anställda på Svenska kraftnät antogs då kabeln bestå av en ledare per fas och vara tillverkade av koppar (Lövebrant 2012).

3.2.2.2 HVDC-markkabel

Den HVDC-markkabel som har implementerats i verktyget har en överföringseffekt på 700 MW, en spänningsnivå på 300 kV, ledare av aluminium och isolering av XLPE. Dessa val har genomförts utifrån kontakt med kabeltillverkare samt projektdokumentation från Svenska kraftnät. Aluminiumledare har valts då detta material används vid de flesta HVDC-markkablar på grund av de höga kostnaderna för kopparledare. Vid de markkabelprojekt som Svenska kraftnät har genomfört de senaste åren har XLPE-isolering använts som isoleringsmaterial, vilket därför har valts som standard i miljövärderingsverktyget (Svk 2010a, s.24; Svk 2010b, s.26; Hansson 2016a).

3.2.2.3 HVDC-sjökabel

Två olika HVDC-sjökablar har implementerats i miljövärderingsverktyget utifrån kontakt med kabeltillverkare och projektdokumentation från Svenska kraftnät. De båda sjökablarna har en överföringseffekt på 700 MW och en spänningsnivå på 300 kV. Båda kablarna isoleras med XLPE eftersom denna isolering används i stor utsträckning för den aktuella spänningsnivån. Det som skiljer de två ledarna är valet av ledarmaterial, då den ena har en aluminiumledare medan den andra kabeln har en ledare av koppar. Svenska kraftnäts senaste sjökabelprojekt mellan Sverige och Litauen har konstruerats med aluminiumledare, men då det ofta görs ett val mellan aluminium- och kopparledare vid sjökabelprojekt har båda dessa material implementerats i verktyget (Svk 2010b, s.27, Svk 2013e, s.13; Hansson 2016b).

Tabell 8. Sammanställning av de olika kablarna som implementerats i miljövärderingsverktyget.

Kabeltyp	Ledarmaterial	Ledararea (mm ²)	Isolering
AC markkabel	Koppar	3x2500	XLPE
HVDC markkabel	Aluminium	2000	XLPE
HVDC sjökabel	Koppar	1100	XLPE
	Aluminium	1700	XLPE

3.2.3 Station

Olika typer av stationskomponenter har implementerats i verktyget och dessa beskrivs i följande avsnitt.

3.2.3.1 Ställverk

Två typer av ställverk har implementerats i verktyget, dels ett luftisolerat dubbelbrytarställverk (AIS) och ett SF₆-isolerat ställverk (GIS). Materialdata har erhållits från en rapport från ABB där ett 220 kV ställverk med fem ledningsfack och plats för en transformator samt två mättransformatorer har studerats (Arnell 2010). I verktyget har ställverket implementerats med data per ledningsfack för att på ett enkelt sätt reglera storleken på det avsedda ställverket. Då inga liknande studier har genomförts för ett 400 kV-ställverk har värdena för 220 kV-ställverket skalats upp med en faktor 1,4 för att motsvara den högre spänningsnivån (Lövebrant 2012).

3.2.3.2 Omriktarstation

Materialanvändningen för en omriktarstation har erhållits från en rapport från ABB, där materialet har sammanställts för HVDC-stationen i Nybro som använder sig av VSC-teknik (Arnell 2012). Det kan även antas att omriktarstationer med andra tekniker har liknande materialåtgång och att de därför kan approximeras med implementerad materialdata för omriktarstationen med VSC-teknik. Storleken på omriktarstationer varierar mellan olika projekt men eftersom de innehåller många olika komponenter och det inte har genomförts några andra sammanställningar för en hel omriktarstation har dessa materialdata antagits vara representativa.

3.2.3.3 Transformator

Tre olika effektnivåer för transformatorer har implementerats i verktyget; 250 MVA, 500 MVA och 750 MVA. Materialdata för 250 MVA- och 500 MVA-transformatorn har erhållits från miljövarudeklarationer (*Environmental product declaration, EPD*) från ABB. Den studerade 250 MVA-transformatorn är anpassad för transformering mellan 400/135 kV, medan 500 MVA-transformatorn anges ha ett spänningsområde upp till 600 kV (ABB 2003a; ABB 2003b). Då någon liknande miljövarudeklaration inte finns tillgänglig för 750 MVA-transformatorer har materialdata för 500 MVA-transformatorn skalats upp linjärt för att motsvara 750 MVA. Materialanvändningen för 750 MVA-transformatorn har vidare validerats mot Svenska kraftnäts interna projektdata för transformatorer med samma storlek.

3.2.3.4 Reaktor

Den reaktor som implementerats i verktyget har en effekt på 150 MVA_r, vilket är en vanlig effektnivå för reaktorerna i stamnätet. Materialdata för denna reaktor har erhållits från det tidigare genomförda examensarbetet på Svenska kraftnät, som utgått från interna uppgifter från Svk (Lövebrant 2012).

3.2.3.5 Kondensator

En kondensator med effekt på 165 MVA_r har implementerats i verktyget, då detta är en vanligt förekommande storlek på kondensatorerna i stamnätet. Materialdata har erhållits utifrån Svenska kraftnäts interna projektdata för en station i stamnätet.

3.2.4 Skogsdata

I Tabell 9 presenteras markbehovet för luftledning, markkabel och station som har implementerats i miljövärderingsverktyget.

Tabell 9. Sammanställning av markbehovet för byggnation samt drift för luftledning och markkabel.

Stamnätskomponent	Markbehov byggnation - bredd gata/dike (m)	Markbehov drift - bredd gata/dike (m)
AC luftledning - 220 kV	22 ^a	22 ^a
AC luftledning - 400 kV	44 ^a	44 ^a
DC luftledning (julgransstolpe)	35 ^b	35 ^b
Markkabel	20 ^c	8 ^c
	Markbehov (m ²)	
AC-station (AIS)	25 000 ^c	
AC-station (GIS)	7 500 ^d	
Omriktarstation	50 000 ^{b,c,e, f}	

^a(Svk 2014a), ^b(Svk 2010a), ^c(Svk 2010b), ^d(ABB 2016a), ^e(Svk 2006, s.20), ^f(Lövebrant 2012).

Den uteblivna koldioxidinlagringen, som härrör från byggnation och drift av stamnätskomponenterna, varierar med hur stor mängd skog som avverkas. Mängden skog beror i sin tur på den avverkade arean, andelen skogsmark, virkesförråd och den årliga skogliga tillväxten på den aktuella platsen. Dessa parametrar varierar över landet och i verktyget har Sverige därför delats in i Norrland, Svealand och Götaland. Den procentuella andelen skogsmark på investeringsplatsen anges som inparameter i verktyget. Beräkningar för skogsdata i Lövebrant (2012) har använts i verktyget och presenteras i Appendix C.

3.2.5 Bränsleförbrukning

Bränsleförbrukningen för en stamnätskomponents livscykel kan delas upp i byggnation, drift och rivning. Alla underleverantörer som genomför byggnationer i stamnätet rapporterar in bränsleförbrukning till Svenska kraftnät. Utifrån dessa bränslerapporter har representativa projekt sammanställts för luftledning, markkabel, sjökabel, AC-station och omriktarstation.

Bränsleförbrukningen för byggnationsfasen varierar mycket mellan olika projekt beroende på aktuella förhållanden som till exempel underlag och terräng. Markberedningen för stationer står till exempel för en stor del av den totala bränsleförbrukningen under byggnationsfasen av en station och kan öka drastiskt om det uppstår problem. De aktuella markförhållandena för respektive projekt är dock sällan känt när den samhällsekonomiska analysen genomförs och miljövärderingsverktyget skall användas. Ett medelvärde har därför uppskattats utifrån projekt som anses ha en representativ bränsleförbrukning för respektive teknik. För sjökabel har *Nordbalt* valts som enda referensprojekt eftersom det inte har funnits några andra sjökabelprojekt med inrapporterad bränsleförbrukning. Eftersom inrapporteringen skett under en begränsad tid har endast några projekt för respektive teknik funnits tillgängliga, men dessa schablonvärden kan dock antas ge en grov uppskattning kring bränsleförbrukningen för investeringar i framtiden.

Bränsleförbrukningen för tekniskt- och skogligt underhåll av stamnätskomponenterna, med indelning på stationer respektive ledningar, rapporteras in av aktuella entreprenörer till Svenska kraftnät. Bränsleförbrukningen för underhåll och besiktning av stationer fanns tillgänglig sedan fyra år tillbaka i tiden och utifrån dessa har ett medelvärde beräknats per station. För ledningar fanns två års statistik tillgänglig och bränsleförbrukningen har beräknats per kilometer luftledning respektive kabel. Bränsleförbrukningen för underhåll av kablar kan dock påverkas i stor utsträckning om det uppstår ett fel i kabeln eftersom det kan leda till omfattande reparationer. Eftersom sådana fel är svåra att förutse har bränsleförbrukningen för dessa inte tagits hänsyn till i verktyget.

Bränsleförbrukningen för byggnation och drift av respektive teknik åskådliggörs i Tabell 10 och Tabell 11. Utförligare information kring vilka projekt som dessa medelvärden har baserats på presenteras i Appendix D.

Specifik bränsleförbrukning för rivning av ledningar och stationer i stamnätet rapporteras i dagsläget inte utan ingår ofta i större projekt där även byggnation inkluderas. Bränsleförbrukningen för rivningsfasen har därför antagits uppgå till ungefär 80 % av bränsleförbrukningen för byggnationsfasen, i linje med det förra miljövärderingsverktyget (Lövebrant 2012). Detta värde har dock implementerats i verktyget på sådant sätt att det enkelt kan uppdateras om utförligare data erhålls.

I Ecoinvent har anläggningsmaskiner som drivs på diesel och bensen används. Data för anläggningsmaskiner som drivs på etanol och naturgas saknas dock i Ecoinvent. Eftersom det rör sig om små bränslemängder jämfört med användningen av bensen och diesel har användningen av naturgas försumrats. Maskiner som drivs på etanol har approximerats med en anläggningsmaskin som drivs på bensen. Helikoptern som används under driftsfasen har antagits vara en av de mindre modellerna med en bränsleförbrukning på omkring 110 liter/timme (Stockholm Helikoptertjänst 2012). Energiinnehållet för diesel har antagits till 9,8 kWh/liter vilket motsvarar 35,3 MJ/liter (Biogasportalen 2015).

Eftersom produktion av komponenterna antas ske i Europa och Sverige har ett medelvärde för materialtransportsträckan uppskattats genom att anta att transporterna sker från Centraleuropa till Sverige. Användaren av verktyget kan sedan välja om transporterna skall ske till Norrland, Svealand eller Götaland, beroende på i vilken region som elnätsinvesteringen skall genomföras. En mer specifik indelning av transporterna är inte möjlig vid den tidpunkt i projektet som verktyget skall användas och eftersom tillverkare för de aktuella komponenterna ännu inte är kända. I slutskedet kan komponenterna komma att tillverkas i allt ifrån mellersta Sverige eller södra Europa till övriga delar av världen beroende på vem som vinner upphandlingen, vilket kan medföra stora variationer i transportsträcka mellan olika projekt.

Materialtransporten från produktionsanläggningen till byggnationsplatsen har antagits ske med lastbil med fyllnadsgrad på 50 % och en lastvikt på 32 ton. Transportsträckan för materialet har antagits vara 2000 km till Norrland, 1500 km till Svealand och 1000 km till Götaland. Den sand som krävs vid byggnation av stamnätsprojekt har antagits uppgå till 50 km eftersom sanden antas komma från lokala grustag (Lövebrant 2012).

Tabell 10. Sammanställning av genomsnittlig bränsleförbrukning för byggnation av respektive teknik.

Byggnation ledningar och kablar	Diesel (l/km)	Bensin (l/km)
Luftledning	11 960	218
Markkabel	9 645	35
Sjökabel	15 456	0
Byggnation AC- stationer	Diesel (l/fack)	Bensin (l/fack)
AC-station	50 228	60
Byggnation omriktarstation	Diesel (l/station)	Bensin (l/station)
Omriktarstation	329 584	0

Tabell 11. Sammanställning av bränsleförbrukningen för drift av respektive teknik.

Drift ledning och markkabel	Diesel (l/km)	Bensin (l/km)	Etanol (l/km)	Naturgas (l/km)	Flygbränsle (l/km)
Luftledning	30	0,7	0	0	1,4
Markkabel	4	0,1	0	0	1,4
Drift station	Diesel (l/station)	Bensin (l/station)	Etanol (l/station)	Naturgas (l/station)	
Station	1 203	146	8	1	

3.3 Indata från miljöpåverkansbedömning (LCIA-data)

Miljöpåverkan från de olika komponenterna i stamnätet har delats upp för respektive material, där data hämtats från Ecoinvent. Indata för deponi av kreosot har inte funnit tillgängligt i Ecoinvent och data har därför tagits från det tidigare miljövärderingsverktyget. De olika materialen som har valts presenteras i Appendix E. Då det har varit möjligt har data från produktions- och avfallsanläggningar inom Europa valts men då sådana processer har saknats har global data valts. Alla ingående material i stamnätskomponenterna finns inte implementerade i Ecoinvent-databasen och då indata har saknats har ett liknande material valts.

Betong har implementerats med två olika typer, dels en färdigblandad betong som används vid platsgjutna fundament samt färdigproducerade betongblock som har antagits motsvara prefabricerade betongfundament.

Glas till isolatorer finns inte implementerat i Ecoinvent men tillverkning av platt obestruket glas har antagits ske på liknande sätt och har därför valts istället. Porslin till isolatorer finns inte i databasen men sanitetsporslin antas ha motsvarande tillverkningsprocess.

Kreosotimpregnerade träsyllar har approximerats med processen för framställning av kreosot, produktion av kluvet timmer av tall samt processen för impregnering av trä. I Ecoinvent

inkluderas framställningen av kreosot i impregneringsprocessen och för att undvika dubbelräkning har framställning av kreosot subtraherats från impregneringsprocessen.

Silikongummi har approximerats med tillverkning av syntetiskt gummi och papperet i stationskomponenterna har antagits vara detsamma som oblekt papper. Eftersom transformatorolja inte finns implementerat i verktyget har den approximerats med produktion av lätt eldningsolja. Färgen i stamnätskomponenterna används i största utsträckning för att måla metaller och produktionen av färg för elektrostatisk målning av aluminium har därför använts.

Miljöpåverkan för aluminium, stål, bly, koppar och zink har delats upp i brytning och produktion eftersom endast det jungfruliga materialet belastas med miljöpåverkan för brytning. Både det jungfruliga och nedsmälta återvunna materialet går dock igenom produktionsprocessen och 100 % av det ingående materialet belastas därför med miljöpåverkan från denna process. Brytning av bly, koppar och zink har antagits ske i en gruva där guld, silver, zink och koppar bryts gemensamt. För stål inkluderas legeringsprocessen i produktionen av materialet. Data för produktion av armering saknas i Ecoinvent och har därför approximerats med tillverkning av stål.

4 Tillämpning av miljövärderingsverktyg

För att visa på skillnaderna i miljökostnad vid val av olika tekniker vid investeringar i stamnätet har miljövärderingsverktyget tillämpats på en identisk ledningssträcka av 50 km där verktygets alla implementerade lednings- och kabeltekniker har testats och jämförts. Utöver dessa tekniker har även en studie genomförts för att undersöka vilken stationsteknik som ger lägst miljöpåverkan och lägst total miljökostnad. Miljövärderingsverktyget har dessutom tillämpats på ett verkligt utbyggnadsprojekt där valet står mellan olika tekniklösningar, där den samhällsekonomiska analysen avgör vilket alternativ som är bäst lämpat. Denna tillämpning har genomförts för att visa på hur verktyget kommer att användas i Svenska kraftnäts verksamhet.

4.1 Tillämpning 1: Val av teknik vid 50 km ledningssträcka

Den första tillämpningen har utförts för de tekniker som anges i Tabell 12. Analysen har utförts för en tänkt ledningssträcka på 50 km i Norrland med 100 % skog. Då luftledningar anläggs kopplas de ofta in i befintliga stationer genom att ett nytt fack byggs i den befintliga stationen. I denna tillämpning antas luftledningen kopplas in i en befintlig station genom tillbyggnation av ett fack i ena änden av ledningen och att en ny station byggs i den andra änden. Den nybyggda stationen har antagits bestå av tre AIS-fack och en transformator, totalt för hela ledningsprojektet blir det därmed fyra AIS-fack och en transformator. HVDC-tekniker förekommer inte i lika stor utsträckning i det svenska elstamnätet och vid byggnation av dessa tekniker krävs anläggning av två stycken omriktarstationer. Ytterligare teknisk specifikation samt övrig indata för de implementerade teknikerna presenteras i Appendix F.

Tabell 12. Sammanställning av teknikerna som studerats i tillämpningen av miljövärderingsverktyget.

Ledning/kabel	Station
1. AC-luftledning 220 kV	4 st AIS-fack (220 kV), 1 transformator (250 MVA)
2. AC-luftledning 400 kV	4 st AIS-fack (400 kV), 1 transformator (500 MVA)
3. HVDC-luftledning	2 st omriktarstationer
4. AC-markkabel	4 st AIS-fack (400 kV), 1 transformator (500 MVA)
5. HVDC-markkabel	2 st omriktarstationer
6. HVDC-sjökabel	2 st omriktarstationer

4.2 Tillämpning 2: Val av stationsteknik

En analys har även genomförts för de stationstekniker som finns implementerade i miljövärderingsverktyget för att undersöka skillnaden i miljöpåverkan och total miljökostnad mellan olika stationsinvesteringar. De tekniska specifikationerna för de AC-stationer som har studerats i tillämpningen åskådliggörs i Tabell 13. Utöver dessa stationer har även en fullständig omriktarstation studerats. Stationerna har analyserats för en placering i Norrland med 100 % skog.

Tabell 13. Sammanställning av teknikerna för de AC-stationer som studerats i tillämpningen av miljövärderingsverktyget.

	Ledningsfack	Transformator	Reaktor
1.	3 st AIS-fack (220 kV)	1 st (250 MVA)	1 st (150 MVar)
2.	3 st GIS-fack (220 kV)	1 st (250 MVA)	1 st (150 MVar)
3.	3 st AIS-fack (400 kV)	1 st (500 MVA)	1 st (150 MVar)
4.	3 st GIS-fack (400 kV)	1 st (500 MVA)	1 st (150 MVar)

4.3 Tillämpning 3: Val av teknik vid utbyggnadsprojekt

Svenska kraftnät och Fingrid, den finska stamnätsägaren, bedriver för närvarande en studie av kapacitetsbehovet mellan Sverige och Finland. Tre nätalternativ från denna studie har implementerats i verktyget för att undersöka respektive alternativs miljökostnad. Ett fjärde nätalternativ har även testats för att möjliggöra en jämförelse med HVDC-luftledning. De fyra alternativen som har analyserats i verktyget presenteras i Tabell 14. Anledningen till att den totala sträckan för de olika alternativen varierar är att detta projekt inte behöver byggas mellan två specifika punkter i nätet. Alternativen skall istället studeras för olika tekniker och platser för att hitta den bästa nätlösningen utifrån den samhällsekonomiska analysen. Ytterligare teknisk specifikation samt övrig indata för de olika alternativen presenteras i Appendix F. Eftersom projektet är i ett tidigt stadium har standardtyper för ledningar och kablar med mera använts då de exakta teknikerna och förhållandena fortfarande inte är bestämda.

Tabell 14. Sammanställning av de alternativ som studeras för ett utbyggnadsprojekt i tillämpningen av miljövärderingsverktyget.

	Luftledning	HVDC-markkabel	HVDC-sjökabel	Station
1.	206 km (HVDC-luft)	0 km	0 km	2 st omriktarstationer
2.	206 km (AC-luft 400 kV)	0 km	0 km	2 st fack AIS-400 kV
3.	90 km (AC-luft 400 kV)	60 km	135 km	2 st omriktarstationer 1 st fack AIS-400 kV
4.	0 km	34 km	199 km	2 st omriktarstationer

4.4 Känslighetsanalys

Eftersom livscykelanalysen innehåller många olika antaganden och förenklingar har en känslighetsanalys genomförts med syftet att undersöka hur stor inverkan olika parametrar har på slutresultatet. Denna analys ger även en bild över hur kvalitetssäkert miljövärderingsverktyget är samt vilka indata som har särskilt stor påverkan och bör studeras utförligare i vidare studier.

Känslighetsanalysen har genomförts för AC-luftledning 400 kV, HVDC-markkabel, 400 kV AIS-station och en fullständig omriktarstation. Dessa tekniker har valts för att analysera mertalet av de antaganden och indata som finns i verktyget samt för att analysen skall belysa de flesta komponenterna i stamnätet. Dessa tekniker har studerats utifrån ett referensfall på en plats i Norrland med 100 % skog, övrig teknisk specifikation för de valda komponenterna presenteras i Appendix G. Känslighetsanalysen har studerat hur den totala miljökostnaden förändras då de olika parametrarna ändras.

De parametrar som har studerats i känslighetsanalysen är

- transportsträckan för stamnätskomponenterna från produktion- till byggnationsplats
- den ekonomiska värderingen för koldioxid-, partikel-, svaveldioxid- och fosforekvivalenter
- markanvändningen vid byggnation och drift av stamnätskomponenter.

4.4.1 Känslighetsanalys – Materialtransport

Den uppskattade transportsträckan för stamnätskomponenterna från produktionsanläggningen ut till den aktuella byggnationsplatsen bygger på grova antaganden och är därför intressant att studera i en känslighetsanalys. Om det visar sig att en förändrad transportsträcka får stor inverkan på resultatet är det viktigt att kvalitetssäkra dessa indata ytterligare.

Känslighetsanalysen har genomförts genom att ändra den ursprungliga transportsträckan med ± 40 %. Det vill säga genom att ändra sträckan mellan 60 % till 140 % av den ursprungliga transportsträckan, vilket i detta fall var 2000 km eftersom Norrland valdes som referensregion.

4.4.2 Känslighetsanalys – Ekonomisk värdering

En känslighetsanalys för den ekonomiska värderingen har genomförts eftersom det ofta är förknippat med stor osäkerhet att uttrycka miljöeffekter i monetära termer. Det sågs även vara av intresse att undersöka vilken ekonomisk värdering av utsläppen som har störst påverkan på slutresultatet och som därmed är viktigast att uppdatera kontinuerligt. Känslighetsanalysen har genomförts utifrån ett medelvärde för analyserna av de fyra stamnätsteknikerna. Koldioxidekvivalenterna värderades inom ett brett spann i Noring (2014) och utifrån denna variation har värden valts för känslighetsanalysen för koldioxidvärderingen, vilka presenteras i Tabell 15. Samma procentuella fördelning har sedan applicerats för resterande utsläppsvärderingar för att kunna jämföra dessa med varandra. De värden som detta intervall motsvarar för respektive utsläppskategori presenteras i Tabell 15.

Tabell 15. Sammanställning av värderingsvärden samt motsvarande intervall för respektive utsläppsvärdering. Där 100 % motsvarar ursprungsvärdet av värderingen. En andel på 9 % av ursprungsvärdet motsvarar alltså en minskning med 91 %.

Miljöpåverkans-kategori	9 %	44 %	100 %	263 %	307 %	518 %	Enhet
Klimatpåverkan	0,1 ^a	0,5	1,14 ^b	3 ^c	3,5 ^d	5,9 ^e	kr/ kg CO ₂ -ekv
Partikelformering	25	124	283	745	869	1465	kr/ kg PM ₁₀ -ekv
Förurning	3	14	32	83	97	163	kr/ kg SO ₂ -ekv
Övergödning	62	308	703	1850	2158	3638	kr/ kg P-ekv

^a Lägsta värdering i Noring (2014), ^b Vald värdering i verktyget, ^c Medelvärde i värdering i Noring (2014), ^d Värde för känslighetsanalys i Trafikverket (2016c), ^e Högsta värdering i Noring (2014).

4.4.3 Känslighetsanalys – Markanvändning

Känslighetsanalysen för markanvändning vid byggnation och drift av stamnätskomponenter har genomförts eftersom markbehovet kan variera mellan olika projekt, bland annat på grund av sambyggnad av ledningsgator. Det råder även en relativt stor osäkerhet i indata för AC- och omriktarstationer eftersom markanvändningen varierar mycket mellan olika projekt.

Känslighetsanalysen har genomförts genom att ändra den ursprungliga markanvändningen med ± 40 %, det vill säga genom att ändra markanvändningen mellan 60 % till 140 % av det ursprungliga värdet.

5 Resultat

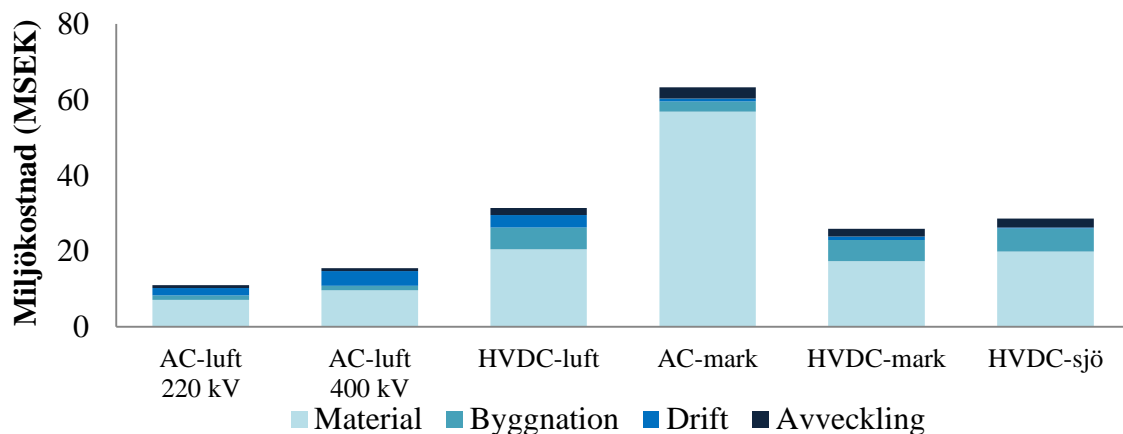
I följande avsnitt presenteras resultaten från de tre tillämpningarna av miljövärderingsverktyget samt de känslighetsanalyser som har genomförts.

5.1 Tillämpning 1: Val av teknik vid 50 km ledningssträcka

Vid jämförelse mellan resultatet för de olika lednings- och kabelteknikerna, enligt Figur 13, ses att AC-markkabel ger den största miljökostnaden under livscykeln. Anledningen till detta är den stora påverkan som materialet till kabeln ger, framförallt från mängden koppar i ledaren. Den teknik som ger den lägsta miljökostnaden är 220 kV AC-luftledning. Ett tydligt resultat är dock att materialfasen har den absolut största påverkan på den totala miljökostnaden under livscykeln för samtliga lednings- och kabeltekniker.

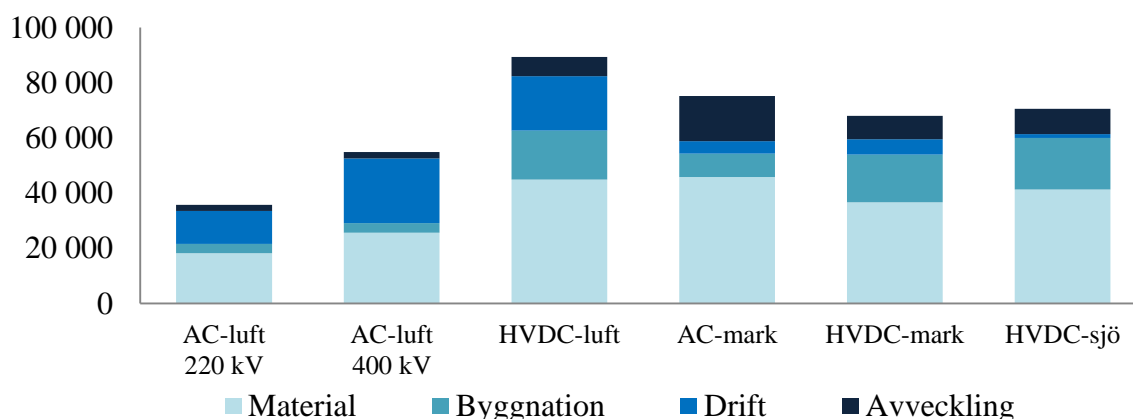
Sett till enbart klimatpåverkan är HVDC-luftledning det sämsta alternativet, enligt Figur 14. Anledningen till att AC-markkabel totalt sett ger den största miljökostnaden är på grund av de högre utsläppen av PM₁₀-, SO₄- och P-ekvivalenter jämfört med HVDC-luftledning, vilket kan ses i Figur 15. Dessa utsläpp har en högre ekonomisk värdering än CO₂-ekvivalenter, vilket därmed ger den höga totala miljökostnaden. Detta visar på betydelsen av vilka värden och metoder som väljs för den ekonomiska värderingen.

Utsläppen av koldioxidekvivalenter för denna tillämpning uppgår som mest till omkring 90 000 ton, vilket presenteras i Figur 14. Detta kan sättas i relation till Sveriges totala utsläpp från el- och fjärrvärmeproduktionen som år 2014 uppgick till 6 773 000 ton CO₂-ekvivalenter (Naturvårdsverket 2015).

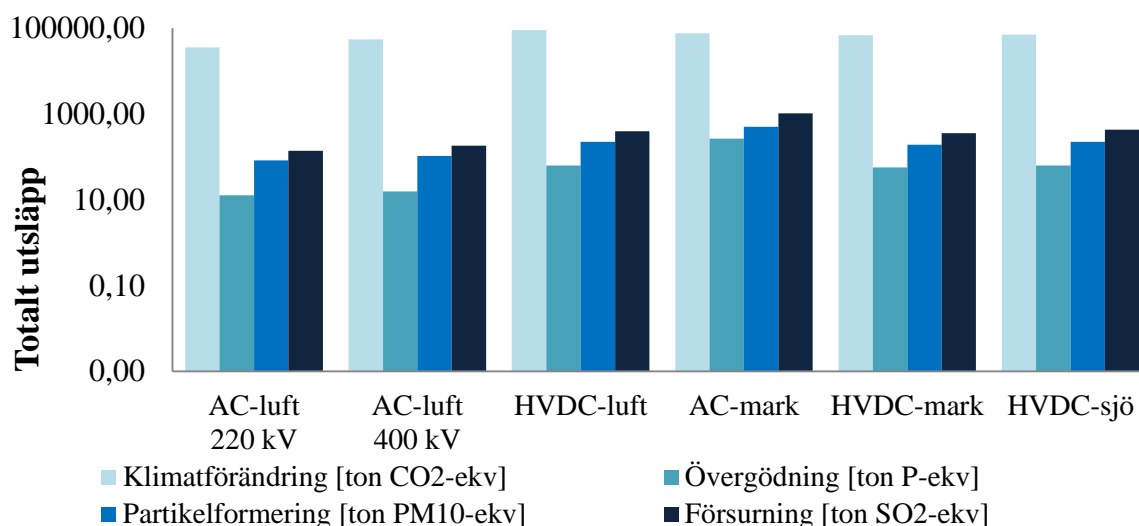


Figur 13. Den totala miljökostnaden för varje fas under livscykeln för stamnätsteknikerna i tillämpning 1.

Klimatpåverkan (ton CO₂-ekv)



Figur 14. Den totala klimatpåverkan för varje fas under livscykeln för stamnätsteknikerna i tillämpning 1.



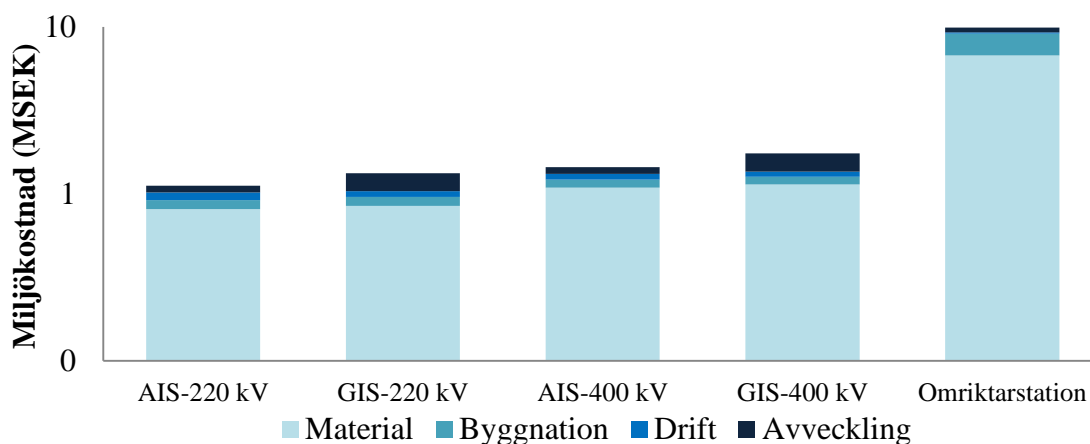
Figur 15. De totala utsläppen under livscykeln för stamnätsteknikerna i tillämpning 1 (logaritmisk skala).

5.2 Tillämpning 2: Val av stationsteknik

Resultatet för tillämpning två visar att omriktarstationen ger klart störst miljökostnad och utsläpp, vilket ses i Figur 16, Figur 17 och Figur 18. Detta kan förklaras med att en fullständig omriktarstation är betydligt större och har ungefär 35 gånger mer ingående material än en 400 kV-station. Även i denna tillämpning ses det tydligt att materialfasen har den absolut största påverkan på den totala miljökostnaden under livscykeln.

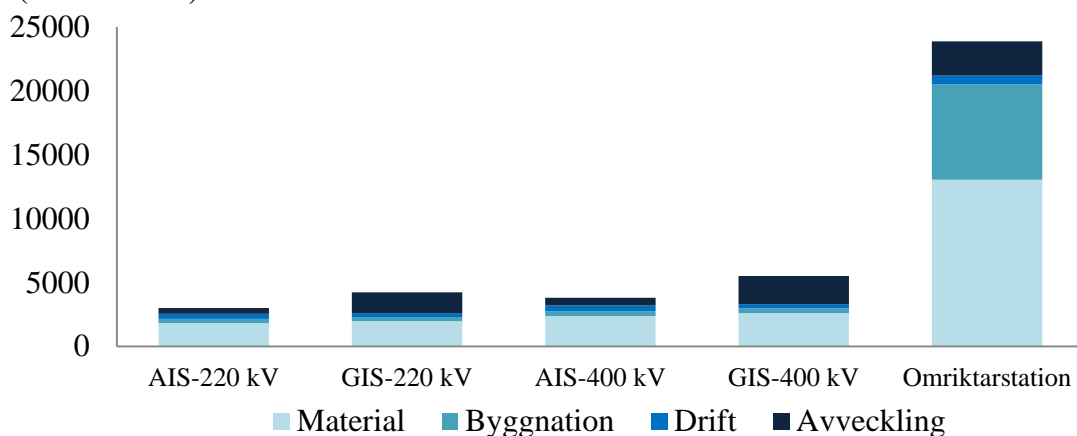
Sett till de olika teknikerna för AC-stationer har de luftisolerade stationerna lägre miljökostnad än de gasisolerade stationerna med samma spänningsnivå, enligt Figur 16. Den minskade markanvändningen för GIS-stationer jämfört med AIS-stationer kompenserar inte för miljöpåverkan från den ökade användningen av SF₆-gas som krävs vid GIS-stationer. SF₆-gasen i GIS-stationerna ger en större påverkan både under material- och rivningsfasen

jämfört med AIS-stationerna. GIS-stationer används i regel på grund av platsbrist och en AIS-station är då inte en möjlig lösning. I dessa fall har miljöpåverkan därmed en liten påverkan i valet av station.

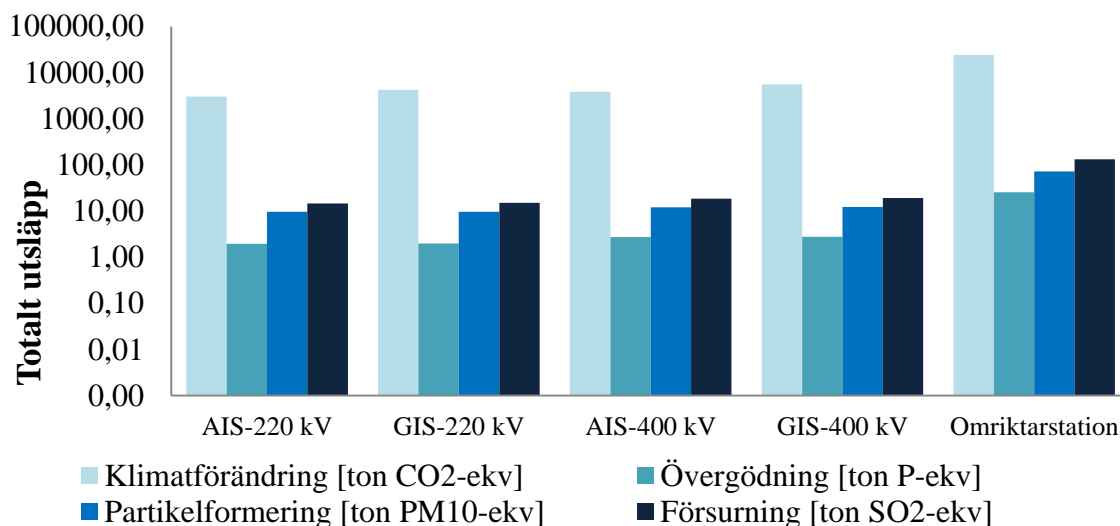


Figur 16. Den totala miljökostnaden för varje fas under livscykeln för stamnätsteknikerna i tillämpning 2 (logaritmisk skala).

Klimatpåverkan (ton CO₂-ekv)



Figur 17. Den totala klimatpåverkan för varje fas under livscykeln för stamnätsteknikerna i tillämpning 2.

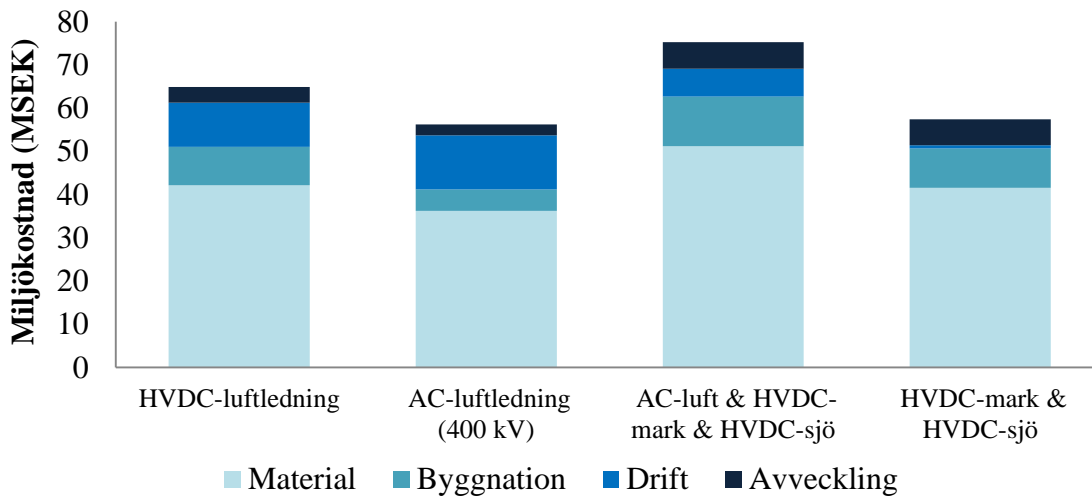


Figur 18. De totala utsläppen under livscykeln för stamnätsteknikerna i tillämpning 2 (logaritmisk skala).

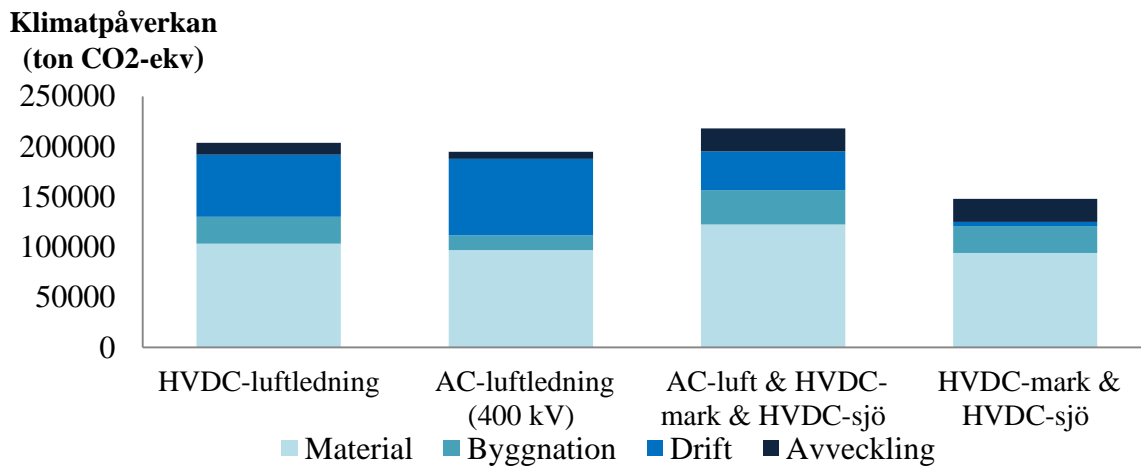
5.3 Tillämpning 3: Val av teknik vid utbyggnadsprojekt

Resultatet för tillämpning tre visar att alternativ två, AC-luftledning, ger en miljökostnad på 56,2 miljoner kronor och är därmed det bästa alternativet sett utifrån total miljökostnad. Alternativ fyra med HVDC-markkabel och HVDC-sjökabel ger dock en liknande miljökostnad, 57,4 miljoner kronor. Resultatet för tillämpning tre kan ses i Figur 19. Alternativ fyra får dock en lägre miljöpåverkan jämfört med de övriga alternativen eftersom detta projekt är planerat i Svealand med 60 % skog, medan alternativ ett, två och tre är planerat i Norrland med 80 % skog. Alternativ tre med AC-luftledning, HVDC-markkabel och HVDC-sjökabel ger den högsta miljökostnaden främst på grund av att det är den längsta lednings- och kabelsträckan samt att detta alternativ kräver två omriktarstationer samt ett AIS-fack. Alternativ fyra ger dock den lägsta klimatpåverkan av projekten, vilket beror på att detta alternativ har ett litet utsläpp av CO₂-ekvivalenter, men ett stort utsläpp av PM₁₀-, SO₄- och P-ekvivalenter, vilket kan ses i Figur 20 och Figur 21. Även i denna tillämpning ses det tydligt att materialfasen har den största påverkan på slutresultatet.

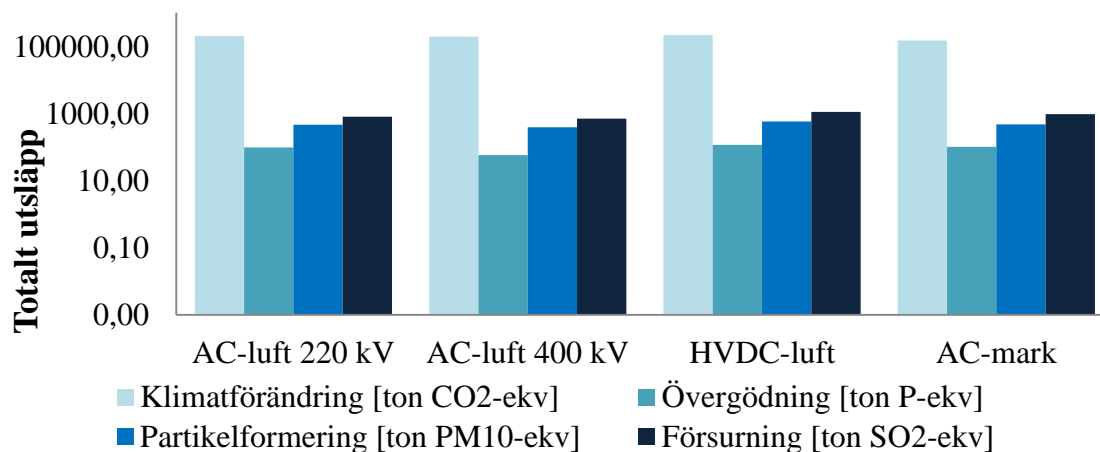
Eftersom miljövärderingen endast är en del av den samhällsekonomiska analysen kan dock ett annat alternativ än alternativ två, 400 kV AC-luftledning, visa sig vara det mest samhällsekonomiskt lönsamma projektet. Denna miljövärderingsanalys tar inte heller hänsyn till miljöpåverkan från förluster eller ändrad produktionsmix vid byggnation av nya luftledningar och kablar, vilket kan påverka valet av alternativ.



Figur 19. Den totala miljökostnaden för varje fas under livscykeln för stamnätsteknikerna i tillämpning 3.



Figur 20. Den totala klimatpåverkan för varje fas under livscykeln för stamnätsteknikerna i tillämpning 3.

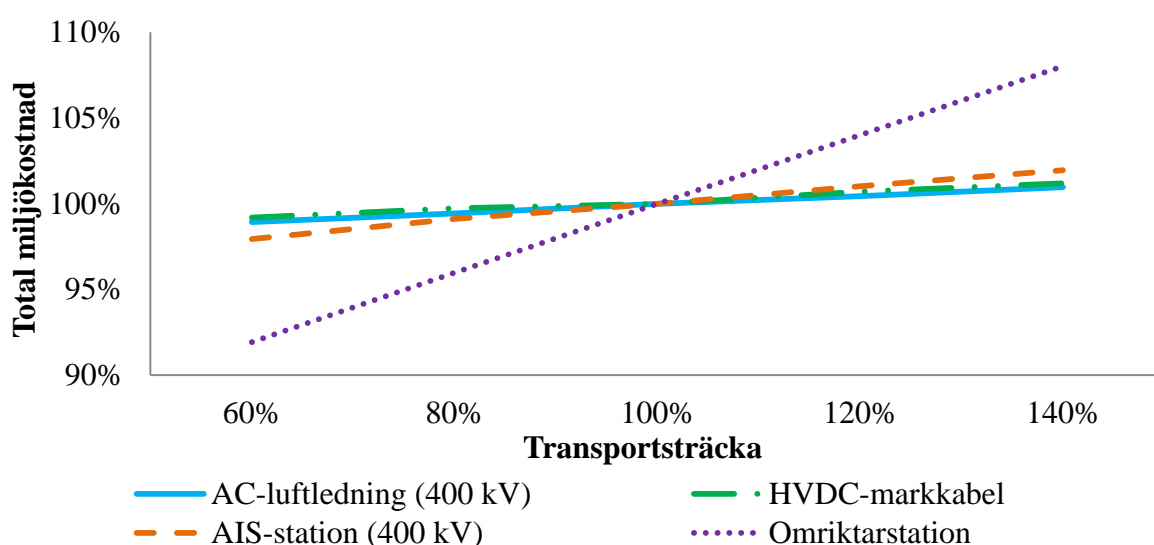


Figur 21. De totala utsläppen under livscykeln för stamnätsteknikerna i tillämpning 3 (logaritmisk skala).

5.4 Känslighetsanalys – Materialtransport

Resultatet visar på att den totala miljökostnaden för samtliga utvalda tekniker, utom omriktarstationen, påverkas i liten omfattning av transportsträckan, vilket redovisas i Figur 22. I känslighetsanalysen för omriktarstationen ses dock att transportsträckan har en relativt stor påverkan på den totala miljökostnaden, vilket kan förklaras med att den totala vikten av en omriktarstation är betydligt större än för de övriga stamnätskomponenterna.

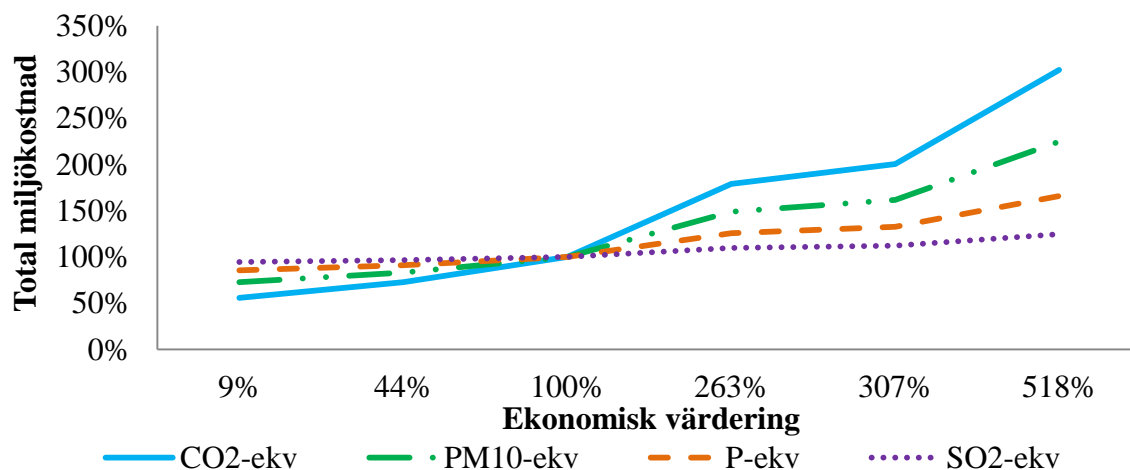
De approximationer som genomförts för transportsträckan kan därmed antas ge acceptabla felmarginaler för de flesta stamnätsprojekt. Vid de projekt där omriktarstationer ingår kan det dock vara av vikt att studera i vilken region som stationen skall produceras och ändra transportsträckan i verktyget vid behov, eftersom transportsträckan ses ha så pass stor påverkan för dessa projekt.



Figur 22. Resultat från känslighetsanalys av transportsträckan från produktionsanläggning till byggnationsplats för de valda stamnätskomponenterna, där 100 % motsvarar det ursprungliga värdet för miljökostnaden och transportsträckan. En andel på 60 % av ursprungsvärdet motsvarar alltså en minskning av transportsträckan med 40 %.

5.5 Känslighetsanalys – Ekonomisk värdering

Känslighetsanalysen av den ekonomiska värderingen, som presenteras i Figur 23, visar att den totala miljökostnaden påverkas i mycket liten grad av en förändrad ekonomisk värdering för SO₂-ekvivalenterna. De ekonomiska värderingarna för PM₁₀- och P-ekvivalenter ses ha en viss påverkan på den totala miljökostnaden, men påverkan är relativt liten vid små förändringar av värderingarna. En förändring av den ekonomiska värderingen för CO₂-ekvivalenter ger dock en stor påverkan, där den högsta värderingen för CO₂-ekvivalenter i Noring (2014) ger en 350 % högre miljökostnad än den lägsta värderingen. Det kan även ses att små förändringar av värderingen av CO₂-ekvivalenter ger en relativt stor påverkan på den totala miljökostnaden. Utifrån denna analys ses det därför vara av störst vikt att värderingen för CO₂-ekvivalenter är uppdaterad med aktuella värden samt har baserats på goda grunder.

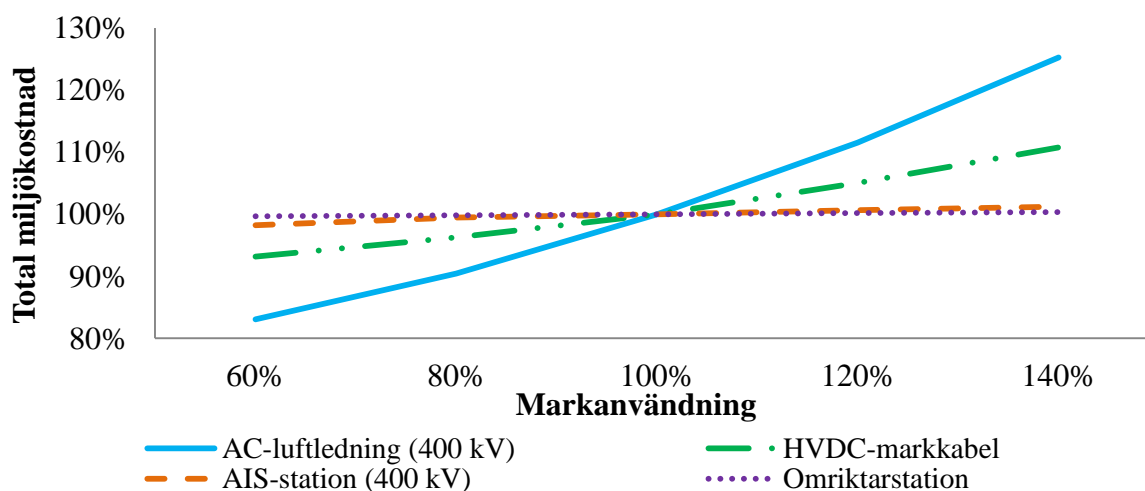


Figur 23. Resultat från känslighetsanalys av den ekonomiska värderingen för koldioxid-, partikel-, svaveldioxid- och fosforekvivalenter, där 100 % motsvarar det ursprungliga värdet för miljökostnaden och den ekonomiska värderingen. En andel på 9 % av ursprungsvärdet motsvarar alltså en minskning av den ekonomiska värderingen med 91 %.

5.6 Känslighetsanalys – Markanvändning

Resultatet från känslighetsanalysen presenteras i Figur 24, där det kan utläsas att den totala miljökostnaden för AIS- och omriktarstationen påverkas i liten utsträckning av indata för markanvändningen och har därför liten påverkan på slutresultatet.

Markanvändningen har dock stor påverkan på den totala miljökostnaden för både AC-luftledning och HVDC-markkabel. Indata för markanvändningen för luftledning och markkabel är dock inte lika osäker som indata för stationerna. Osäkerheten i de implementerade värdena för markanvändning i verktyget kan därför antas ha liten påverkan på den totala miljökostnaden. I de projekt då bredden på lednings- och kabelgatorna, och därmed även markanvändningen, skiljer sig från de implementerade värdena kan dessa enkelt ändras i verktyget för att undvika en felaktig miljökostnad.



Figur 24. Resultat från känslighetsanalys av markavändning vid byggnation och drift av stamnätskomponenter, där 100 % motsvarar det ursprungliga värdet för miljökostnaden och markanvändningen. En andel på 60 % av ursprungsvärdet motsvarar alltså en minskning av markanvändningen med 40 %.

6 Diskussion

Miljöpåverkan från produktion av el har undersökts i många studier genom åren men överföringen av el, det vill säga elnätets miljöpåverkan, har inte studerats i samma omfattning. Infrastruktur för transmission och distribution av el krävs oavsett elens ursprung men valet av teknik vid elöverföring kan dock ha stor påverkan på elnätets totala miljöpåverkan. Bortsett från studien som detta arbete bygger vidare på (Lövebrant 2012) har det inte genomförts några livscykelanalyser över Sveriges elstamnät under de senaste åren. Studier kring den miljöpåverkan som konstruktion och drift av stamnät ger har dock genomförts i större utsträckning för andra länder under de senaste åren. Bland annat i Jorge (2013), där en livscykelanalys genomförts för Norges lokal-, region- och stamnät. Dessa livscykelanalyser har dock, till skillnad från denna analys, den funktionella enheten 1kWh överförd el.

Vid investeringar i stamnätet är det av största vikt att huvudsyftet med projektet uppnås, vilket till exempel kan vara att öka driftsäkerheten i nätet, öka marknadsintegrationen eller ansluta ny produktion. Systemaspekter avgör i regel vilka tekniker som lämpar sig för att syftet med investeringen ska uppnås och finns det flera likvärdiga alternativ ska en samhällsekonomisk analys genomföras. Miljövärderingsverktyget är därför utformat för att kunna jämföra olika alternativ i ett projekt, på liknande sätt som tillämpning tre i avsnitt 4.3. Alla de framtagna alternativen når då upp till det huvudsakliga projektsyftet och miljöpåverkan är aktuell att studera tillsammans med de andra identifierade samhällsekonomiska effekterna för att visa vilket alternativ som är mest lönsamt.

Livscykelanalysen baseras på en rad antaganden och förenklingar, vilket medför att resultatet innehåller en viss grad av osäkerhet. Resultatet ger dock en hänvisning kring vilka indata som är av störst vikt, där materialfasen har den absolut största påverkan på slutresultatet. Detta medför att indata för ingående material samt LCIA-data har en betydande påverkan på slutresultatet. I den mån det har varit möjligt har dock materialdata kontrollerats utifrån flera olika källor för att avgöra rimligheten i dessa. De materialdata som har störst osäkerhet är främst de för omriktarstationen. Anledningen till detta är att de enbart baseras på en källa eftersom att inga liknande sammanställningar har funnits tillgängliga, samtidigt som det rör sig om väldigt stora mängder material. Osäkerheten i resultatet för omriktarstationer bör hållas i åtanke vid analysen, framförallt eftersom det har en relativt stor påverkan på slutresultatet vid HVDC-projekt.

Känslighetsanalysen ger en uppskattning kring vilka parametrar som har störst påverkan på slutresultatet. Utifrån detta resultat kan verktyget sedan användas med viss försiktighet för de parametrar som har stor osäkerhet och stor påverkan på slutresultatet. Detta gäller framförallt den ekonomiska värderingen för CO₂-ekvivalenter, PM₁₀-ekvivalenter och i viss grad även P-ekvivalenter. Värdet på dessa har förvisso underbyggts med två värderingsstudier, men det föreligger ändå en viss osäkerhet i dessa indata. Anledningen till detta är att det alltid finns en osäkerhet i ekonomiska värderingar eftersom resultatet i stor utsträckning beror på metodval och genomförda avgränsningar.

Värderingar som bygger på CV-metoden har även en osäkerhet i att det inte är ett uppvisat beteende hos en marknad eller individer som bedöms, utan individers egen uppskattade betalningsvilja. Individerna kommer därmed inte att behöva betala den summa som de anger, vilket möjliggör att de kan ange ett högre värde än vad de egentligen är beredda att betala. För att erhålla en större säkerhet i den ekonomiska värderingen i detta arbete har de värderingsvärden som bygger på CV-metoden även underbyggts med en värdering som bygger på politiska mål och skatter.

Eftersom den ekonomiska värderingen har en så pass stor påverkan på den totala miljökostnaden är det dock av stor vikt att dessa värden uppdateras kontinuerligt i verktyget för att undvika ett felaktigt resultat. I ett större perspektiv skulle en myndighetsgemensam miljöekonomisk värdering underlätta för jämförbarheten mellan olika samhällsprojekt.

Miljövärderingsverktyget studerar stamnätskomponenternas miljöpåverkan utifrån ett livscykelperspektiv. Vidare systempåverkan, så som miljöpåverkan från elförluster eller förändrad produktionsmix av el till följd av stamnätsinvesteringar, har inte inkluderats i analysen. Miljöpåverkan från dessa kan bli relativt stor och ha en betydande påverkan på den slutliga samhällsekonomiska analysen. För att studera den påverkan som stamnätsinvesteringar ger på systemnivå krävs ett mer omfattande arbete än vad som låg inom ramen för detta arbete. En analys av miljöpåverkan från elförluster och förändrad produktionsmix bör dock utvecklas i vidare studier för att få en mer heltäckande analys av miljöpåverkan vid investeringar i stamnätet.

Livscykelanalysen studerar stamnätskomponenternas hela livscykel men den tekniska livslängden för komponenterna har inte tagits hänsyn till i denna analys. Luftledningar har till exempel generellt sett en längre livslängd än mark- och sjökablar, men i analysen har 40 år använts oavsett teknik. I realiteten skulle eventuellt ett kabelprojekt behöva totalförnyas en gång för att vara jämförbar med den tekniska livslängden för en luftledning. Tekniken för dessa kablar utvecklas dock kontinuerligt och de kablar som byggs idag har inte varit i drift tillräckligt länge för att ge en uppvisad teknisk livslängd. Analysperioden är dock något som bör ses över i vidare studier.

Ytterligare en osäkerhet i indata är bränsleförbrukningen för byggnation av stamnätskomponenterna. Dessa värden baseras visserligen på verkliga projekt genom inrapporterad data men antalet projekt är dock begränsade. För sjökabel finns det till exempel endast tillgång till ett projekt och det är därför svårt att kvalitetssäkra dessa indata. Bränsleförbrukningen för byggnation av stationer bygger dock på fler referensprojekt men det råder trots detta en viss osäkerhet i dessa indata. Anledningen är att stationerna varierar mycket i storlek och markberedningen kan vara betydligt mer omfattande för vissa stationer, till exempel där det krävs sprängningsarbete. Dessa faktorer bidrar i sin tur till en större bränsleförbrukning men det har inte tagits någon hänsyn till detta i sammanställningen av indata.

Bränsleförbrukningen för rivningsfasen har uppskattats till 80 % av den bränsleförbrukning som krävs för byggnationsfasen. Det finns en osäkerhet i detta antagande då det är en grov uppskattning eftersom det inte finns någon dokumenterad bränsleförbrukning för specifika rivningsprojekt. Dessutom krävs det olika typer av markberedning för olika typer av projekt, till exempel påverkas bränsleförbrukningen i stor utsträckning av om marken behöver återställas helt efter rivning eller inte.

Eftersom både drift- och rivningsfasen generellt sett har en liten påverkan på slutresultatet jämfört med till exempel materialfasen, ses osäkerheterna i indata för bränsleförbrukningen vara små utifrån den totala miljökostnaden.

7 Slutsats

En stamnätsinvestering med en ledningssträcka på 50 km kan enligt denna livscykelanalys ge ett utsläpp på upp emot 90 000 ton CO₂-ekvivalenter under livscykeln. Det är därför av vikt att undersöka stamnätsinvesteringarnas miljöpåverkan för att minimera denna miljöpåverkan i största möjliga utsträckning. Att analysera stamnätskomponenters miljöpåverkan sett ur ett livscykelperspektiv är förenat med många antaganden och avgränsningar, vilket är viktigt att ha i åtanke då miljövärderingsverktyget används. Denna bedömning kan dock ses ha en relativt stor säkerhet i och med att metodiken kring livscykelanalysen i grunden bygger på ett tidigare miljövärderingsverktyg som dessutom har kvalitetsgranskats av en utomstående, oberoende part.

Det är inte möjligt att rekommendera en specifik teknik som ger den lägsta miljöpåverkan vid samtliga stamnätsinvesteringar. Resultatet från detta arbete visar dock på att AC-luftledning generellt sett är det alternativ som ger lägsta miljöpåverkan och lägst total miljökostnad. Detta resultat har dock erhållits vid jämförelse mellan alternativ med identiska förhållanden gällande bland annat val av sträckning, andel skog och geografi. En sådan jämförelse sker dock sällan vid verkliga projekt utan det är istället vanligare att olika typer av ledningssträckor och tekniker jämförs mot varandra. Vid sådana typer av analyser kan det därför finnas andra tekniker än AC-luftledning som är bäst lämpade ur ett helhetsperspektiv.

Miljövärderingsverktyget kan på ett enkelt och överskådligt sätt ge en bedömning av miljöpåverkan för varje enskilt projekt och ge en uppskattning kring vilket projekt som är bäst lämpat sett utifrån miljöhänsyn. I och med verktygets monetära värdering av miljöeffekterna möjliggörs även att miljöpåverkan för en investering tas med i de samhällsekonomiska analyserna som genomförs på Svenska kraftnät.

Det skall även förtydligas att detta miljövärderingsverktyg avser till att bedöma miljöpåverkan och den totala miljökostnaden vid investeringar i det svenska stamnätet och ger en uppskattning snarare än ett exakt värde. För att ytterligare kvalitetssäkra miljövärderingsverktyget bör det kvalitetsgranskas av en utomstående oberoende part.

8 Kontinuerlig uppdatering av verktyg och vidare studier

För att minska osäkerheterna i verktyget samt hålla det uppdaterat presenteras förslag på kontinuerliga uppdateringar och vidare studier i följande avsnitt.

8.1 Förslag till kontinuerlig uppdatering

Eftersom att indata för uppdatering av miljövärderingsverktyget finns på flera olika enheter inom Svenska kraftnät bör en yttersta ansvarig utses för uppdatering av verktyget.

De indata som ses vara av vikt att uppdatera kontinuerligt är

- ekonomisk värdering
- bränsleförbrukning
- transportsträcka.

Den ekonomiska värderingen bör uppdateras årligen genom en studie över aktuella värderingar samt utifrån en jämförelse mot de nya värden som Trafikverket presenterar i den årliga utgåvan av ASEK-rapporten. Denna uppdatering är av stor vikt eftersom värderingen har stor påverkan på den totala miljökostnaden. Det kan även vara av vikt att upprätta en kontakt med andra myndigheter för att föra en dialog kring valet av ekonomisk värdering och i längden upprätta en myndighetsgemensam värdering.

Bränsleförbrukningen för byggnation av stamnätskomponenter bör sammanställas allt eftersom nya projekt slutförs. Detta genom att projektledaren för aktuellt projekt rapporterar in den totala bränsleförbrukningen uppdelad på diesel, bensin och flygbränsle samt ledningssträcka eller stationsarea för projektet då det har slutförts. Den ansvarige för uppdateringen av verktyget kan då sammanställa dessa data per station eller per km luftledning eller kabel, för att sedan uppdatera verktyget kontinuerligt. Av särskild vikt är att inrapportering sker för specifika rivningsprojekt för att få en bättre uppskattning kring bränsleförbrukningen för rivningsfasen.

Denna uppdatering ses inte kräva någon större arbetsbelastning eftersom bränslerapporteringen redan sker i dagläget och det tillkommer därför endast ett moment av sammanställning av data.

För att erhålla en högre säkerhet i bränsleförbrukningen för transporter, det vill säga transportsträckan från produktionsanläggning till byggnationsplats, krävs en inrapportering från leverantörer av stamnätskomponenterna. Den inrapportering som då krävs är den uppskattade lastvikten och transportsträckan. Utifrån sådana indata kan sedan ett medelvärde räknas ut för de materialtransporter som sker vid byggnation av stamnätsprojekt. Detta skulle spegla var de flesta produktionsanläggningarna ligger och en större säkerhet i indata skulle erhållas.

8.2 Vidare studier

Utöver dessa kontinuerliga uppdateringar ses även ett behov av vidare studier. Det kan bland annat vara av betydelse att genomföra en mer omfattande och detaljerad livscykelanalys över elnätet i Sverige för att få en bättre uppfattning kring elnätets miljöpåverkan.

För att få en mer heltäckande analys av den totala miljöpåverkan vid investeringar i stamnätet bör en analys genomföras över den miljöpåverkan som härrör från elförluster och förändrad produktionsmix som kan uppstå till följd av investeringar i stamnätet.

Resultatet för omriktarstationer kan användas med större säkerhet om mängden ingående material kvalitetssäkras mot indata från ytterligare en omriktarstation. En sådan analys har dock legat utanför tidsramen för detta arbete och rekommenderas därför som vidare studier.

Referenslista

ABB (2003a). *Environmental Product Declaration – Power transformer TrafoStar 500 MVA* [elektronisk]. Ludvika; ABB Transformers AB. Tillgänglig: <https://library.e.abb.com/public/566748ad75116903c1256d630042f1af/ProductdeclarationStarTrafo500.PDF> [Hämtad 2016-03-30].

ABB (2003b). *Environmental Product Declaration – Power transformer 250 MVA* [elektronisk]. Italy; ABB Transmission & Distribuzione. Rev. 2. 2003-09-10. Tillgänglig: <https://library.e.abb.com/public/e7c381463152c60bc1256de900407090/PT%20250%20MVA.pdf> [Hämtad 2016-03-30].

ABB (2006). *Environmental Product Declaration – GIS Type ELK-3 for 420 kV* [elektronisk]. Switzerland; ABB High Voltage Products. Tillgänglig: https://library.e.abb.com/public/211ccea54bed87acc12571680043449f/1HC0038189_AB_English.pdf [Hämtad 2016-04-12]

ABB (2016a). *Stationer med gasisolerade ställverk – GIS* [elektronisk]. Tillgänglig: <http://new.abb.com/substations/sv/gasisolerade-stallverk-gis> [Hämtad 2016-04-12]

ABB (2016b). *Shuntreaktor för ett stabilt kraftnät* [elektronisk]. Tillgänglig: <http://new.abb.com/se/om-abb/teknik/sa-funkar-det/shuntreaktorer> [Hämtad 2016-03-14].

Ahlroth, S. & Finnveden, G. (2011). *Ecovalue08- A new valuation set for environmental systems analysis tools* [elektronisk]. Journal of cleaner production. Volume 19, november – December 2011, s. 1994-2003. Elsevier. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611002083> [Hämtad 2016-05-09].

Almemark, M & Erlandsson, M (2009). *Background data and assumptions made for an LCA on creosote poles* [elektronisk]. Stockholm; IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd. 2009-10-16. Tillgänglig: <http://www.svenskenergi.se/Global/Dokument/rapporter/LCA-kreosot.pdf> [Hämtad 2016-04-12]

Arnell, S (2010). *LCA of three different solutions for a 220 kV substation. GIS, AIS standard and AIS with disconnection breakers*. Laboratory report, ABB. 2010-06-30.

Arnell, S (2012). *Material for HVDC station Nybro/NordBalt*. Laboratory report, ABB. Rev. 1. 2012-11-23

Biogasportalen (2015). *Energiinnehåll* [elektronisk]. Energigas Sverige. 31 augusti 2015. Tillgänglig: <http://www.biogasportalen.se/FranRavaraTillAnvandning/VadArBiogas/Energiinnehall> [Hämtad 2016-04-29].

Bureau of International Recycling (2015). *World steel recycling in figures 2010-2014. Steel Scrap – a Raw Material for Steelmaking* [elektronisk]. Bryssel: Bureau of International Recycling. Maj 2015. Tillgänglig: http://bdsv.org/downloads/weltstatistik_2010_2014.pdf [Hämtad 2016-04-12]

Carlschem, L (2016). *Ledningsutformning och materialåtgång för 400 kV AC- och 500 kV HVDC-luftledning*. Mailkontakt. Svenska kraftnät. 2016-02-11.

Ecoinvent (2016). *Allocation cut-off by classification* [elektronisk]. Tillgänglig: <http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html> [Hämtad 2016-05-13].

European Aluminium Association & Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters (2006). *Aluminium Recycling in Europe – The road to high quality products* [elektronisk]. Bryssel: EAA/OEA Recycling Division. Tillgänglig: <http://recycling.world-aluminium.org/uploads/media/fl0000217.pdf> [Hämtad 2016-04-12]

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. D., Struijs, J. & Zelm, R. (2009). *ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method wich comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report 1: Characterisation* [elektronisk]. Första upplagan. Nederländerna. Tillgänglig: http://www.leidenuniv.nl/cml/spp/publications/r ecipe_characterisation.pdf [Hämtad 2016-04-23].

Hansson, O (2016a). *Materialdata för HVDC-markkabel 300 kV*. Mailkontakt. ABB. 2016-03-16.

Hansson, O (2016b). *Materialåtgång för HVDC-sjökabel 300 kV*. Mailkontakt. ABB. 2016-03-16.

Hauschild, M. Z., Goedkoop, M., Guinée, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., Margni, M., Schryver, A. D., Humbert, S., Laurent, A., Sala, S., Pant, R. (2012). *Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment* [elektronisk]. The International Journal of Life Cycle Assessment. Mars 2013, Volym 18, Utgåva 3, pp-683-697. 12 september 2012. Tillgänglig: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11367-012-0489-5?no-access=true> [Hämtad 2016-04-23]

Hertwich, E. & Jorge, R. (2013). *Environmental evaluation of power transmission in Norway* [elektronisk]. Applied Energy Vol. 101 (2013) s. 513-520. Elsevier. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191200445X> [Hämtad: 2016-04-04].

International Lead Association (2016). *Lead production* [elektronisk]. Tillgänglig: <http://www.ila-lead.org/lead-facts/lead-production> [Hämtad 2016-04-12]

International Organization for Standardization (2006). *ISO 14040:2006 (en). Environmental management –Life cycle assessment –Principles and framework* [elektronisk]. International Organization for Standardization, ISO. Tillgänglig: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en> [Hämtad 2016-04-22]

International Zink Association (2010). *Zink – A sustainable material* [elektronisk]. Tillgänglig: http://www.zinc.org/wp-content/uploads/sites/4/2015/01/zinc_sustainable_material.pdf [Hämtad 2016-04-12]

- Kinell, G. & Söderqvist, G. (2011). *Ekonomisk värdering med scenariometoder* [elektronisk]. Stockholm: Naturvårdsverket. Rapport 6469. November 2011. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/6400/978-91-620-6469-3.pdf?pid=3777> [Hämtad 2016-05-05].
- Klöpffer, W & Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA) – A guide to best practice*. Tyskland; Wiley – VCH. ISBN: 978-3-527-32986-1.
- Larsson, C (2008). *Elsäkerhetsverkets författningssamling* [elektronisk]. ELSÄK-FS 2008:3. ISSN 1103-405X. 2008-03-28. Tillgänglig: <http://www.google.se/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjz1v-9tcfLAhWlJJoKHVIMBp0QFggbMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.elsakerhetsverket.se%2Fglobalassets%2Fforeskrifter%2F2008-3.pdf&usg=AFQjCNHIR6QP0Tt6gD0nQY3jr5uz4LwfBw&sig2=qxflcgxwfQkEqEP6zz6iVg> [Hämtad 2016-03-17].
- Lövebrant, K. (2012). *Verktyg för värdering av miljöpåverkan vid investeringar i det svenska elstamnätet*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för energi och teknik. ISSN 1654-9392.
- Naturvårdsverket (2009). *Monetära schablonvärden för miljöförändringar* [elektronisk]. Stockholm: Naturvårdsverket. Rapport 6322. December 2009. ISBN 978-91-620-6322-1.pdf. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-6322-1.pdf?pid=3629> [Hämtad 2016-05-04].
- Naturvårdsverket (2010). *Utsläpp i siffror – Svavelhexafluorid (SF6)* [elektronisk]. Stockholm: Naturvårdsverket. 2010-01-12. Tillgänglig: <http://utslappisiffror.naturvardsverket.se/Amnen/Vaxthusgaser/Svavelhexafluorid/> [Hämtad 2016-03-14].
- Naturvårdsverket (2015). *Nationella utsläpp och upptag av växthusgaser* [elektronisk]. Stockholm: Naturvårdsverket. 25 november 2015. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser--nationella-utslapp/?visuallyDisabledSeries=9555e6f80b1f6e47> [Hämtad 2016-05-17].
- Noring, M (2014). *Valuing ecosystem services – linking ecology and policy* [elektronisk]. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan (KTH), avdelningen för miljöstrategisk analys. Doktorsavhandling. ISBN 978-91-7595-364-9. Tillgänglig: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:763108/FULLTEXT01.pdf> [Hämtad 2016-05-04].
- Notisum (2016). *Förordning (2007:1119) med instruktion för Affärsverket svenska kraftnät* [elektronisk]. Tillgänglig: <http://www.notisum.se/rnp/sls/lag/20071119.htm> [Hämtad 2016-05-18].
- Pizzol, M., Weidema, B., Brandão, M. & Osset, P.(2014). *Monetary valuation in life cycle assessment: a review* [elektronisk]. Journal of cleaner production 86 (2015) 170-179. Elsevier. 19 Augusti 2014. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614008294> [Hämtad 2016-05-06].

Röös, E., Patel, M. & Spångberg, J. (2015). *Miljöpåverkan från mjölk och havredryck. En scenarioanalys som inkluderar alternativ markanvändning samt olika infallsvinklar på behovet av nötkött och protein* [elektronisk]. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, fakulteten för naturresurser och lantbruksvetenskap, institutionen för energi och teknik. Rapport 083. ISSN 1654-9405. Tillgänglig: http://pub.epsilon.slu.se/12890/7/roos_et_al_151204.pdf [Hämtad 2016-04-22].

Scandinavian Copper Development Association (2016). *Återvinning – Europas efterfrågan på koppar möts av ökande återvinning* [elektronisk]. Tillgänglig: <http://copperalliance.eu/se/kopparresurser/%C3%A5tervinning> [Hämtad 2016-04-12]

Snabbgrus (2016). *Kabelsand 0-4 mm* [elektronisk]. Tillgänglig: <http://www.snabbgrus.se/p/kabelsand-0-4-mm-486.asp> [Hämtad 2016-04-20].

Stockholms Helikoptertjänst (2012). *Helikopterprestanda vid brandbekämpning* [elektronisk]. Revision 1.3. Mars 2012. Tillgänglig: <http://www.google.se/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjZ9c2Q4LPMahVFEJoKHRIHBu4QFghGMAY&url=http%3A%2F%2Fh24-files.s3.amazonaws.com%2F36255%2F166789-WXpxi.pdf&usg=AFQjCNHYnKgebtgx8yFvAM6o1IKswkbCkw&sig2=qRxJhALadLOfnEE S-g-Jog> [Hämtad 2016-04-29].

Svenska kraftnät (2006). *Miljökonsekvensbeskrivning – Utbyggnad av Fenno-Skan. Likströmsledning Dannebo – Finnböle* [elektronisk]. Stockholm: Svenska kraftnät. December 2006. Tillgänglig: http://www.eib.org/attachments/pipeline/20090784_eia1_sv.pdf [Hämtad 2016-04-04].

Svenska kraftnät (2009a). *Miljökonsekvensbeskrivning - Förnyelse av koncession för befintlig 400 kV ledning Midskog-Stenkullen, del 1 Jämtlands län* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. Juli 2009. Tillgänglig: http://www.svk.se/contentassets/f08de25668f944bb803320a1c55b0e91/0907_mkb_del_1jamtland.pdf [Hämtad 2016-04-04].

Svenska kraftnät (2010a). *Miljökonsekvensbeskrivning Sydvästlänken. Ny likströmsförbindelse Barkeryd – Hurva med spänning upp till 400 kV* [elektronisk]. Del 1 s.1-89. Sundbyberg: Svenska kraftnät. April 2010. Tillgänglig: http://www.svk.se/siteassets/natutveckling/utbyggnadsprojekt/sydvastlanken/dokument/mkb_barkeryd-hurva_slutversion_2010-04-14_webbversion1_dell1.pdf [Hämtad 2016-03-09].

Svenska kraftnät (2010b). *Ny elförbindelse mellan Sverige och Litauen – Nordbalt* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska Kraftnät. December 2010. Tillgänglig: http://www.svk.se/siteassets/natutveckling/utbyggnadsprojekt/nordbalt/dokument/mkb_exkl_bilagor.pdf [Hämtad 2016-03-11].

Svenska kraftnät (2010c). *Miljökonsekvensbeskrivning Sydvästlänken – Ny 400 kV ledning Hallsberg – Östansjö –Barkeryd* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. Januari 2010. Tillgänglig: http://www.svk.se/siteassets/natutveckling/utbyggnadsprojekt/sydvastlanken/dokument/mkb_hallsberg_barkeryd_web_20100208.pdf [Hämtad 2016-04-04].

Svenska kraftnät (2010d). *Miljökonsekvensbeskrivning Sydvästlänken. Ny likströmsförbindelse Barkeryd – Hurva med spänning upp till 400 kV* [elektronisk]. Del 2 s.90-148. Sundbyberg: Svenska kraftnät. April 2010. Tillgänglig:

http://www.svk.se/siteassets/natutveckling/utbyggnadsprojekt/sydvastlanken/dokument/mkb_barkeryd-hurva_slutversion_2010-04-14_webbversion1_del2.pdf [Hämtad 2016-04-04].

Svenska kraftnät (2010e). *Miljökonsekvensbeskrivning förlängning av koncession 220 kV kraftledning Stackbo – Valbo* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. November 2010. Tillgänglig: http://www.svk.se/contentassets/bb106785211047fbb2720976af746327/sammanfattning_mkb-stackbo-valbo.pdf [Hämtad 2016-04-04].

Svenska kraftnät (2012a). *Teknisk riktlinje, luftledningar – linor* [elektronisk]. TR05-04 utg.2. Sundbyberg: Svenska Kraftnät. 2012-04-02. Tillgänglig: <http://www.svk.se/siteassets/aktorsportalen/tekniska-riktlinjer/tr05/1tr-05-04-120402.pdf> [Hämtad 2016-03-09].

Svenska kraftnät (2012b). *Teknisk riktlinje, luftledningar – jordning* [elektronisk]. TR05-13 utg.3. Sundbyberg: Svenska Kraftnät. 2015-11-01. Tillgänglig: <http://www.svk.se/siteassets/aktorsportalen/tekniska-riktlinjer/tr05/tr05-13-utgava-3.pdf> [Hämtad 2016-03-10].

Svenska kraftnät (2012c). *Informationsblad, sydvästlänkens södra gren* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. 2012-06-07. Tillgänglig: http://www.svk.se/contentassets/bd2cf0e5cd334091a575dd4ba5dcda67/sydvastlanken_informationsblad_nyttomstamnatsstationenutanforlyby.pdf [Hämtad 2016-03-14].

Svenska kraftnät (2013a). *Komplettering av samrådsredogörelse 2013-06-25 om ny 400 kV-ledning mellan Stenkullen och Skogssäter* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. 2014-04-16. Tillgänglig: http://www.svk.se/siteassets/natutveckling/utbyggnadsprojekt/skogsater-stenkullen/dokument/samradsredogorelse_samrad_2013.pdf [Hämtad 2016-04-23]

Svenska kraftnät (2013b). *Miljökonsekvensbeskrivning. Ny 400 kV-ledning mellan Lindbacka-Östansjö* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska Kraftnät. November 2013. Tillgänglig: <http://www.svk.se/siteassets/natutveckling/utbyggnadsprojekt/lindbacka-ostansjo/dokument/mkb-lindbacka---ostansjo.pdf> [Hämtad 2016-03-09].

Svenska kraftnät (2013c). *Miljökonsekvensbeskrivning – Ny 400 kV-ledning mellan Forsmark och Stackbo* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. Juni 2013. Tillgänglig: <http://www.svk.se/siteassets/natutveckling/utbyggnadsprojekt/forsmark-stackbo/dokument/forsmark-stackbo-mkb> [Hämtad 2016-04-04].

Svenska kraftnät (2013d). *Om kreosot, kraftledningar och vår miljö* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska Kraftnät. Augusti 2013. Tillgänglig: <http://www.svk.se/siteassets/stamnatet/miljopaverkan/dokument/om-kreosot-kraftledningar-och-var-miljo.pdf> [Hämtad 2016-04-04].

Svenska kraftnät (2013e). *Bilaga 3 – beskrivning av kabelkonstruktion och förläggningsmetoder. Planerad likströmsförbindelse mellan Gotland och fastlandet* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. 2013-09-06. Tillgänglig:

http://www.svk.se/siteassets/natutveckling/utbyggnadsprojekt/gotlandsforbindelsen/dokument/bilaga_3_teknisk_beskrivning.pdf [Hämtad 2016-03-11].

Svenska kraftnät (2013f). *Miljökonsekvensbeskrivning planerad likströmsförbindelse mellan Gotland och fastlandet* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. Oktober 2013. Tillgänglig: http://www.svk.se/siteassets/natutveckling/utbyggnadsprojekt/gotlandsforbindelsen/dokument/mkb_gotlandsforbindelsen.pdf [Hämtad 2016-04-04].

Svenska kraftnät (2014a). *Elnät i fysisk planering. Behandling av ledningar och stationer i fysisk planering och i tillståndsärenden* [elektronisk]. Svenska kraftnät, Svensk Energi. 2014-05-12. Tillgänglig: http://www.svk.se/om-oss/nyheter/allmanna-nyheter/ny-handbok--elnet-i-fysisk-planering/?t_id=1B2M2Y8AsgTpgAmY7PhCfg%3d%3d&t_q=eln%c3%a4t+i+fysisk+planering&t_tags=language%3asv&t_ip=192.121.1.150&t_hit.id=SVK_WebUI_Models_Pages_NewsPage/996736e7-a7a7-434d-85d5-29ea2874d68a_sv&t_hit.pos=2

[Hämtad 2016-03-07].

Svenska kraftnät (2014b). *Vägledning för verksamhet vid markförlagd kabel i stamnätet – till myndigheter, kommuner, allmänhet, ledningsägare och näringsidkare* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. 2014-09-03. Tillgänglig:

<http://www.svk.se/siteassets/stamnatet/elsakerhet/dokument/vagledning-for-verksamhet-vid-stamnatets-markkabel-140903.pdf> [Hämtad 2016-04-04].

Svenska kraftnät (2015a). *Ny 220 kV-ledning Nackaskarv – Högdalen. Samrådsunderlag för planerad ledningsdragning* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. Maj 2015. Tillgänglig: <http://www.svk.se/siteassets/natutveckling/utbyggnadsprojekt/stockholmsstrom/dokument/snosatra-ekudden/samradsunderlag-nackaskarv--hogdalen.pdf> [Hämtad 2016-08-03].

Svenska kraftnät (2015b). *Nätutvecklingsplan 2016 – 2025. En tioårsplan för det svenska elstamnätet* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. 2015-10-26. Tillgänglig: <http://www.svk.se/natutveckling/drivkrafter/natutvecklingsplan-2016---2025/> [Hämtad 2016-03-07].

Svenska kraftnät (2015c). *Teknisk riktlinje, luftledningar – stolpar* [elektronisk]. TR05-03 utg.3. Sundbyberg: Svenska kraftnät. 2015-04-29. Tillgänglig:

<http://www.svk.se/siteassets/aktorsportalen/tekniska-riktlinjer/tr05/tr05-03-luftledningar-stolpar-utgava-3.pdf> [Hämtad 2016-03-09].

Svenska kraftnät (2015d). *Prefabricerade kraftledningsfundament – livscykelanalys*. Sundbyberg: Svenska kraftnät. 2015-05-19.

Svenska kraftnät (2015e). *Miljökonsekvensbeskrivning – byte av 400 kV-kablar mellan Skåne och Själland* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. Mars 2015. Tillgänglig: <http://www.svk.se/siteassets/naturutveckling/utbyggnadsprojekt/sjallandskablar/dokument/bilaga-6-mkb.pdf> [Hämtad 2016-03-10].

Svenska kraftnät (2015f). *Samrådsunderlag över flera ledningsalternativ – Ny 220 kV-ledning Snösätra –Högdalen* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. Maj 2015. Tillgänglig: http://www.svk.se/siteassets/naturutveckling/utbyggnadsprojekt/stockholmsstrom/dokument/snosatra-ekudden/samradsunderlag-hogdalen-snosatra-150507_mindre-storlek.pdf [Hämtad 2016-04-04].

Svenska kraftnät (2016a). *Stamnätet* [elektronisk]. Tillgänglig: <http://www.svk.se/stamnatet/> [Hämtad 2016-03-29].

Svenska kraftnät (2016b). Intern bildbank.

Svenska kraftnät (2016c). *Årsredovisning 2015* [elektronisk]. Sundbyberg: Svenska kraftnät. Februari 2016. Tillgänglig: http://www.svk.se/siteassets/om-oss/organisation/finansiell-information/svenska-kraftnat-arsredovisning-2015.pdf? t_id=1B2M2Y8AsgTpgAmY7PhCfg==& t_q=%C3%A5rsredovisning& t_tags=language:sv& t_ip=192.121.1.150& t_hit.id=SVK_WebUI_Models_Media_OfficeDocument_2854c1be-1cc7-41b4-b960-7e80992d2401& t_hit.pos=10 [Hämtad 2016-04-19].

Svensk Energi (u.å). *Skiss över elområden*. Tillgänglig: http://www.svenskenergi.se/Global/Dokument/information/sverige_elomraden_h%c3%b6guppl%c3%b6st.jpg [Hämtad 2016-03-10].

Sveriges lantbruksuniversitet (2015). *Vad är livscykelanalys?* [elektronisk]. Sveriges lantbruksuniversitet, SLU. Tillgänglig: <http://www.slu.se/sv/institutioner/energi-teknik/forskning/lca/vadar/> [Hämtad 2016-04-22].

Sveriges Riksbank (2016). *Sök räntor & valutakurser* [elektronisk]. 2016-05-03. Tillgänglig: <http://www.riksbank.se/sv/Rantor-och-valutakurser/Sok-rantor-och-valutakurser/?g130-SEKEURPMI=on&from=2016-04-05&to=2016-05-03&f=Day&cAverage=Average&s=Comma> [Hämtad 2016-05-03].

Trafikverket (2016a). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.0. Kapitel 1 – Inledning* [elektronisk]. Trafikverket. 2016-04-01. Tillgänglig: http://www.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/01_forord_inledning_a60.pdf [Hämtad 2016-05-03].

Trafikverket (2016b). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.0. Kapitel 11 – Kostnad för luftföroreningar* [elektronisk]. Trafikverket. 2016-04-01. Tillgänglig: http://www.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/11_luftfororeningar_a60.pdf [Hämtad 2016-05-03].

Trafikverket (2016c). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.0. Kapitel 12 – Kostnad för climateffekter* [elektronisk]. Trafikverket. 2016-04-01. Tillgänglig:

http://www.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/12_klimat effekter_a60.pdf [Hämtad 2016-05-03].

Trafikverket (2016d). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.0. Kapitel 5 - Kalkylprinciper och generella kalkylvärden* [elektronisk]. Trafikverket. 2016-04-01. Tillgänglig:

http://www.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/05_generella_principer_o_varden_a60.pdf [Hämtad 2016-05-03].

Worzyk, T (2009). *Submarine Power Cables - Design, Installation, Repair, Environmental Aspects* [elektronisk]. Berlin: Springer. Vers.1. E-ISBN 978-3-642-01270-9. Tillgänglig:

<http://www.springer.com/us/book/9783642012693> [Hämtad 2016-03-10].

Appendix A: Materialdata för stamnätskomponenterna

I Tabell A1-5 presenteras de materialdata som implementerats för de olika stamnätskomponenterna i miljövärderingsverktyget.

Tabell A1. Tabell över implementerade materialdata för AC-luftledning 220 kV och 400 kV.

Materialåtgång (kg) - beräknat per km	AC-luftledning 220 kV och 400 kV									
	Al-59					FeAl				
	Fastlina					Fastlina				
[mm ²]	Simplex 454	Simplex 593	Simplex 774	Simplex 910		Simplex 454	Simplex 593	Simplex 774	Simplex 910	
Aluminium	3 750,00	4 920,00	6 420,00	7 530,00		3 254,95	4 251,53	5 549,74	6 541,28	
Betong [m ³]										
Betong [kg]										
Bitumen										
Bly										
Glasfiber										
Isolatorglas										
Koppar										
Kreosot										
Papper										
Polyeten										
Polypropylen										
Porslin										
Sand										
SF6										
Silikon gummi										
Stål						1 231,99	1 609,13	2 098,73	2 419,71	
Traföolja										
Trä										
Träsyll-impregnerad										
Zink										
Färg										
Epoxiharts										
Total vikt	3 750,00	4 920,00	6 420,00	7 530,00		4 486,94	5 860,66	7 648,47	8 960,99	

Tabell A2. Tabell över implementerade materialdata för AC-luftledning 220 kV och 400 kV.

Materialåtgång (kg) - beräknat per km	AC-luftledning 220 kV och 400 kV						
	Topplina					Markledare	
	Fe			FeAl			Cu
[mm ²]	52	68	319	142	241	319	50 70
Aluminium				242,58	410,81	677,38	
Betong [m ³]							
Betong [kg]							
Bitumen							
Bly							
Glasfiber							
Isolatorglas							
Koppar							446,30 624,82
Kreosot							
Papper							
Polyeten							
Polypropylen							
Porslin							
Sand							
SF6							
Stilkongummi							
Stål	409,45	535,43	2 511,81	410,66	699,58	536,38	
Traföolja							
Trä							
Träsvil-impregnerad							
Zink							
Färg							
Epoxiharts							
Total vikt	409,45	535,43	2 511,81	653,25	1 110,39	1 213,75	446,30 624,82

Tabell A3. Tabell över implementerade materialdata för AC-luftledning 220 kV och 400 kV och HVDC-luftledning

Materialgång (kg) - beräknat per km	AC-luftledning				HVDC-luftledning			
	Stolpe	Fundament			Fas- och topplinor	Stolpe och fundament	Markledare	Total HVDC-luftledning
	Stadsgad A-stolpe	Antal fundament/km		6,00	Al-59	Julgransstolpe (stadsgad)	Cu	
		Platsguten betong	Prefab betong	Träsylv	3 x 774 mm2	Betongfundament	50 mm2	
Aluminium					13 741,00			13 741,00
Betong [m3]						92,00		92,00
Betong [kg]		62 100,00	12 420,00					
Bitumen								
Bly								
Glasfiber								
Isolatorglas	1 047,00					835,00		835,00
Koppar							446,30	446,30
Kreosot				211,80				
Papper								
Polyeten								
Polypropylen								
Porslin								
Sand								
SF6								
Silikon gummi								
Stål	23 382,00	2 643,00	684,00	3 042,00		31 332,00		31 332,00
Traföolja								
Trä								
Träsylv-impregnerad				2 898,00				
Zink	529,00					515,00		515,00
Färg								
Epoxiharts								
Total vikt	24 958,00	64 743,00	13 104,00	6 151,80	13 741,00	32 774,00	446,30	46 961,30

Tabell A4. Tabell över implementerade materialdata för AC-markkabel och HVDC-markkabel och -sjökabel.

Materialåtgång (kg) beräknat per km	AC Markkabel	HVDC Markkabel	HVDC Sjökabel	
	400 kV	300 kV	300 kV/ 700 MW Al-ledare/XLPE- isolering	300 kV / 700 MW Cu-ledare/XLPE- isolering
		700 MW		
		XLPE-isolering	1700 mm2	1100 mm2
	Koppar (3x2500 mm2)	Aluminium (2000 mm2)	Aluminium (1700 mm2)	Koppar (1100 mm2)
Aluminium		11 600,00	9 600,00	
Betong [m3]				
Betong [kg]				
Bitumen	4 500,00		800,00	760,00
Bly			22 000,00	20 000,00
Glasfiber				
Isolatorglas				
Koppar	212 900,00	1 800,00		19 600,00
Kreosot				
Papper				
Polyeten	92 000,00	12 540,00	10 650,00	10 120,00
Polypropylen			1 400,00	1 340,00
Porslin				
Sand	1 740 000,00	570 000,00		
SF6				
Stilkongummi				
Stål			20 000,00	18 600,00
Trafoolja				
Trä				
Träsyll- impregnerad				
Zink				
Färg				
Epoxiharts				
Total vikt	2 049 400,00	595 940,00	64 450,00	70 420,00

Tabell A5. Tabell över implementerade materialdata för AC-station och omriktarstation.

Materialåtgång (kg) - beräknat per km	Station									
	Ledningsfack (220 kV)		Ledningsfack (400 kV)		Transformator			Reaktor	Kondensator	Omriktarstation
	AIS dubbelbrytare	GIS	AIS dubbelbrytare	GIS						
	AIS - 220 kV	GIS - 220 kV	AIS - 400 kV	GIS - 400 kV	250 MVA	500 MVA	750 MVA	150 MVAr	165 MVAr	Fullständig station
Aluminium	5 566,60	8 035,00	7 793,24	11 249,00	1 987,00				700,00	440 803,00
Betong [m3]	129,80	112,80	181,72	157,92						
Betong [kg]										15 185 040,00
Bitumen										
Bly										
Glasfiber	618,20	10,60	865,48	14,84	1 109,00	2 600,00	3 900,00			
Isolatorglas										12 773,00
Koppar	1 010,40	1 470,00	1 414,56	2 058,00	24 228,00	39 960,00	59 940,00	16,00		219 703,00
Kreosot										
Papper	421,20	61,00	589,68	85,40	1 479,00	3 445,00	5 167,50	1 600,00		
Polyeten	133,60	107,20	187,04	150,08						486 595,00
Polypropylen	1,20	114,80	1,68	160,72						
Porslin	4 537,80	1 422,20	6 352,92	1 991,08	2 009,00	2 650,00	3 975,00		4 200,00	67 052,00
Sand	2 160,00	-	3 024,00							
SF6	87,20	394,60	122,08	552,44						211,00
Stilkongummi	919,60	67,20	1 287,44	94,08						
Stål	32 230,00	28 906,80	45 122,00	40 469,52	112 738,00	153 258,00	229 887,00	80 000,00	13 958,00	647 053,00
Trätoolja	1 128,00	240,00	1 579,20	336,00	48 000,00	63 000,00	94 500,00	35 000,00	3 538,00	233 685,00
Trä	57,60	1 120,00	80,64	1 568,00	5 294,00	15 000,00	22 500,00			23 040,00
Träskyll-impregnerad										
Zink	162,00	103,80	226,80	145,32						
Färg					95,00	2 200,00	3 300,00			
Epoxiharts	227,60	525,20	318,64	735,28	188,00	455,00	682,50			
Total vikt	49 390,80	42 691,20	69 147,12	59 767,68	197 127,00	282 568,00	423 852,00	116 616,00	22 396,00	17 315 955,00

Appendix B: Linmaterial och linareor för AC-luftledning

De olika material samt areor som finns implementerade i miljövärderingsverktyget för AC-luftledning för 220 kV och 400 kV specificeras i Tabell B1.

Tabell B1. Linmaterial samt linareor för AC-luftledning för 220 kV och 400 kV.

Typ av lina	Material	Linarea	Area (mm ²)			
Faslina	FeAl	Total linarea	454	593	774	910
		– area Al	402	525	685	808
		– area Fe	52	68	89	102
	Al-59	Total linarea	454	593	774	910
Topplina	FeAl	Total linarea	142	241	319	
		– area Al	90	152	251	
		– area Fe	52	89	68	
	Fe	Total linarea	52	68	319	
Markledare	Cu	Total linarea	50	70		

Appendix C: Skogsdata

De skogsdata som använts i verktyget vid beräkning av total avverkad skog och utebliven koldioxidlagring vid byggnation och drift av stamnätskomponenterna presenteras i Tabell C1.

Tabell C1. Sammanställning av skogsdata som använts vid beräkning av utebliven koldioxidlagring vid avverkning av skog vid byggnation och drift av stamnätskomponenter (Lövebrant 2012). Där m³fub står för kubikmeter fast under bark.

Region	Virkesvolym (m ³ fub/ha)
Norrland	74,3
Svealand	116,6
Götaland	138,2

Region	Årlig skoglig tillväxt (m ³ fub)
Norrland	3,6
Svealand	6,2
Götaland	8,6

Region	Koldioxidlagring (kg/ m ³ fub)
Sverige	720

Appendix D: Bränsleförbrukning

De referensprojekt och tillhörande bränsleförbrukning som har använts för att beräkna ett medelvärde för bränsleförbrukningen för respektive stamnätsteknik presenteras i Tabell D1. I Tabell D2 presenteras den totala sammanställningen av bränsleförbrukningen för drift av ledningar och stationer.

Tabell D1. Sammanställning av bränsleförbrukningen för byggnation av referensprojekt för respektive teknik.

Byggnation ledningar och kablar	Diesel (l/km)	Bensin (l/km)
Medelvärde luftledning	11 960	218
– Lindome – Stenkullen	12 460	297
– Stackbo – Hamra	11 461	139
Medelvärde markkabel	9 645	35
– Nordbalt markkabel	8 822	63
– Sydvästlänken	10 468	7
Medelvärde sjökabel	15 456	0
– Nordbalt sjökabel	15 456	0
Byggnation AC- stationer	Diesel (l/station)	Bensin (l/station)
Medelvärde AC-station	50 228	60
– Högnäs	19 712	0
– Djuptjärn	32 290	40
– Barkeryd AC	67 995	40
– Östansjö	80 916	100
Byggnation omriktarstation	Diesel (l/station)	Bensin (l/station)
Medelvärde omriktarstation	329 584	0
– Nybro DC	119 489	0
– Barkeryd DC	245 686	0
– Hurva DC	623 577	0

Tabell D2. Sammanställning av bränsleförbrukningen per år för underhåll och besiktning av respektive teknik.

Drift ledning och markkabel	Diesel (l/km)	Bensin (l/km)	Etanol (l/km)	Naturgas (l/km)	Flygbränsle (l/km)
Medelvärde luftledning	30	0,7	0	0	1,4
– År 2014	30,7	1,38	0	0	1,48
– År 2015	28,4	0,07	0	0	1,36
Medelvärde markkabel	4	0,1	0	0	1,4
– År 2014	3,7	0,1646	0	0	1,48
– År 2015	3,4	0,008	0	0	1,36
Drift station	Diesel (l/station)	Bensin (l/station)	Etanol (l/station)	Naturgas (l/station)	
Medelvärde station	1 203	146	8	1	
– År 2012	1 195	340	0	0	
– År 2013	1 848	225	0	0	
– År 2014	1 192	10	20	2	
– År 2015	577	10	13	3	

Appendix E: Val av Ecoinventdata

En sammanställning av valda material samt val av avfallshantering som genomförts i Ecoinvent 3.2 presenteras i Tabell E1.

Tabell E1. Sammanställning av valda material samt avfallshantering i Ecoinvent 3.2.

Material	Materialval i Ecoinvent	Region	Avfallshantering i Ecoinvent	Region
Aluminium - brytning	aluminium milling, average	RER	Återvinning	
Aluminium - produktion	aluminium production, primary, ingot	IAI Area, Europe outside EU & EFTA	Återvinning	
Betong [m3]	concrete production, for civil engineering, with cement CEM I	CH	treatment of waste concrete, inert material landfill	CH
Prefabricerad betong [kg]	concrete block production	DE	treatment of waste concrete, inert material landfill	CH
Bitumen	bitumen adhesive compound production, hot	RER	treatment of waste bitumen sheet, municipal incineration	RoW
Bly – brytning och raffinering	gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining	SE	Återvinning	
Bly - produktion	primary lead production from concentrate	GLO	Återvinning	
Epoxiharts	epoxy resin production, liquid	RER	treatment of waste polypropylene, municipal incineration	CH
Färg	paint production, for electrostatic painting for aluminium	GLO	treatment of waste paint, inert material landfill	CH

Glasfiber	glass fibre production	RER	treatment of waste glass, inert material landfill	CH
Isolatorglas	flat glass production, uncoated	RER	treatment of waste glass, inert material landfill	CH
Koppar – brytning och raffinering	gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining	SE	Återvinning	
Koppar - produktion	copper production, primary, RER	RER	Återvinning	
Kreosot	wood preservative production, creosote	RER	Deponidata saknas i Ecoinvent, indata från Lövebrant (2012).	
Kreosot + impregnering	wood preservation, pressure vessel, creosote, outdoor use, ground contact	RER	Deponi, se träsyll	
Kreosot-impregnering	Beräknat genom (Impregnering+kreosot)-(Kreosot)	RER	Deponi, se träsyll	
Papper	kraft paper production, unbleached	RER	treatment of waste paperboard, municipal incineration	CH
Polyeten	polyethylene production, high density, granulate	RER	treatment of waste polyethylene, municipal incineration	CH
Polypropylen	polypropylene production, granulate	RER	treatment of waste polypropylene, municipal incineration	CH
Porslin	sanitary ceramics production	CH	treatment of waste glass, inert material landfill	CH
Sand	gravel and sand quarry operation	CH	Deponi, antas ha försumbar påverkan	

SF ₆	sulfur hexafluoride production, liquid	RER	Totalt läckage 5,5%, räknas om med faktor 1 kg SF ₆ -gas=22 800 kg CO ₂ -ekv	
Silikongummi	synthetic rubber production	RER	treatment of waste polypropylene, municipal incineration	CH
Stål - brytning	steel milling, average	RER	Återvinning	
Stål - produktion	steel production, converter, low-alloyed	RER	Återvinning	
Transformator -olja	petroleum refinery operation	CH	Återvinning	
Träsyll - produktion	softwood forestry, pine, sustainable forest management	SE	treatment of waste wood, untreated, sanitary landfill	CH
Zink – brytning och raffinering	gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining	SE	Återvinning	
Zink - produktion	primary zinc production from concentrate	RoW	Återvinning	
Fordon	Materialval i Ecoinvent	Region	Avfallshantering i Ecoinvent	Region
Diesel (anläggningsmaskin) [MJ]	diesel, burned in building machine	GLO		
Bensin - maskinmotor	Data saknas i Ecoinvent, indata från Lövebrant (2012).			
Helikopter [h]	transport, helicopter	GLO		
Lastbil [tonkm]	transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO3	RER		

Appendix F: Valda tekniker för tillämpning av verktyget

Tillämpning 1: Val av teknik vid 50 km ledningssträcka

Teknisk specifikation samt övrig indata för de implementerade teknikerna vid tillämpning ett presenteras i Tabell G1.

Tabell G1. Sammanställning av teknisk specifikation och indata för tillämpning 1.

AC-luftledning – 220 kV	
Längd	50 km
Faslina	FeAl 3x593 mm ²
Topplina	FeAl 1x142 mm ²
Markledare	50 mm ²
Fundament	Prefabricerad betong
Fack	4 st AIS-220 kV
Transformator	1 st 250 MVA
AC-luftledning – 400 kV	
Längd	50 km
Faslina	Al-59 3x910 mm ²
Topplina	FeAl 1x142 mm ²
Markledare	50 mm ²
Fundament	Prefabricerad betong
Fack	4 st AIS- 400 kV
Transformator	1 st 500 MVA
HVDC-luftledning	
Längd	50 km
Omriktarstation	2 st
AC-markkabel	
Längd	50 km
Fack	4 st AIS- 400 kV

Transformator	1 st 500 MVA
---------------	--------------

HVDC-markkabel

Längd	50 km
-------	-------

Omriktarstation	2 st
-----------------	------

HVDC-sjökabel

Längd	50 km
-------	-------

Ledarmaterial	Aluminium
---------------	-----------

Omriktarstation	2 st
-----------------	------

Övrig indata

Analysperiod	40 år
--------------	-------

Kalkylränta	5 %
-------------	-----

Region	Norrland
--------	----------

Andel skog	100 %
------------	-------

Tillämpning 3: Val av teknik vid utbyggnadsprojekt

Teknisk specifikation samt övrig indata för de olika alternativen som studerats vid tillämpning tre presenteras i Tabell G2.

Tabell G2. Sammanställning av teknisk specifikation och indata för tillämpning 3.

AC-luftledning – 400 kV				
Faslina	Al-59 3x910 mm ²			
Topplina	FeAl 1x142 mm ²			
Markledare	50 mm ²			
Fundament	2/3 prefabricerad betong			
	1/3 platsgjuten betong			
HVDC-sjökabel				
Ledarmaterial	Aluminium			
AC-station				
Fack	AIS-400 kV			
Övrig indata				
Analysperiod	40 år			
Kalkylränta	5 %			
	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3	Alternativ 4
Region	Norrland	Norrland	Norrland	Svealand
Andel skog	80 %	80 %	80 %	60 %

Appendix G: Valda tekniker för känslighetsanalys

De tekniska specifikationerna för de olika stamnätskomponenterna som har ingått i känslighetsanalysen redovisas i Tabell F1.

Tabell F1. Sammanställning av indata för känslighetsanalysen.

AC-luftledning – 400 kV	
Längd	1 km
Faslina	Al-59 3x910 mm ²
Topplina	FeAl 1x142 mm ²
Markledare	50 mm ²
Fundament	Prefabricerad betong
HVDC-markkabel	
Längd	1 km
AC-station – AIS 400 kV	
Antal fack	3 st
Antal transformatorer (500 MVA)	1 st
Antal reaktorer (165 MVar)	1 st
Omriktarstation	
Antal	1 st
Övrig indata	
Analysperiod	40 år
Kalkylränta	5 %
Region	Norrland
Andel skog	100 %

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energioghteknik

SLU
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000